

DOI:10.12171/j.1000-1522.20190263

豫西浅山区不同世代刺槐林土壤养分与结构特征

王雅慧¹ 彭祚登¹ 李云²

(1. 北京林业大学林学院, 省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 北京林业大学生物与技术学院, 北京 100083)

摘要:【目的】探究林木对立地质量的影响是人工林可持续经营研究的重要方向, 研究刺槐人工林多代更替经营过程中土壤结构与养分的变化情况, 可以为刺槐人工林多代经营目标下土壤地力调控措施的制定提供理论依据。【方法】本研究以豫西浅山丘陵区相同龄级的一代、二代、三代刺槐林及对照无林地作为研究对象, 对其土壤养分与结构特征进行了比较研究。【结果】(1) 本研究中刺槐一代林到二代林土壤养分显著增加($P < 0.05$)。在表土层(0~5 cm)中, 有机质、全氮、硝态氮含量分别增加了 94.0%、91.0%、169.4%, 在 10~20 cm 层分别增加了 82.77%、61.14%、343.35%, 在 40~60 cm 层分别增加了 53.25%、21.60%、556.20%, 一代林地全氮含量在各土层由浅到深分别为 0.63、0.39、0.29、0.28 g/kg。刺槐二代林和三代林土壤养分含量整体差异不显著。与对照地相比, 刺槐一代林地的有机质、全氮、全磷含量均显著低于对照($P < 0.05$), 但对照地的硝态氮含量显著低于一代林地($P < 0.05$)。土壤表层养分含量高于深层, 且随世代的增加养分含量在上层土壤的增量大于深层土壤。从化学计量学角度分析, 各土层中一代林地的 C/P、N/P 都表现出高于二、三代林地。相比于有机质和全氮含量, 随世代增加过程中 C/N 值较为稳定, 深土层的 C/P 与 N/P 较稳定。从一代林到三代林, 表土层和 10~20 cm 层的 C/P 的增幅大于 N/P 的增幅。(2) 从土壤密度、孔隙度、团聚体反映的土壤结构性看, 非毛管孔隙度在 10~20 cm 处, 二代林地、三代林地相比于一代林地分别增加了 11.4%、21.4%, 在 40~60 cm 层也随世代增加呈上升趋势。土层越深各代际林地向土壤密度变化幅度越大, 除表土层外, 土壤密度在其他各土层随世代总体呈下降趋势。各样地土壤表层水稳性团聚体数量及稳定性表现为对照地 > 二、三代林地 > 一代林地。从整体上看, 土壤结构表层优于深层, 二、三代林地优于一代林地。(3) 基于土壤养分与结构性质的主成分分析表明, 林木对深层土壤的作用明显, 二、三代林地土壤状况显著优于一代林, 二代林地的表层土壤性质优于三代, 深层土壤三代优于二代。【结论】在豫西浅山区, 刺槐林经营世代更替对土壤养分和结构有明显的影响, 一代林到二代林经营过程中土壤养分含量显著增加, 表层养分增量大于深层, 土壤结构得到改善, 经营到三代林维持相对稳定。在世代增加过程中碳素比氮素积累的速度快, 且碳氮的供应能力小于磷, 代际更替过程中存在着养分失衡加重的问题。

关键词: 刺槐; 豫西丘陵区; 土壤养分; 土壤结构; 不同世代人工林

中图分类号: S792.26; S718.51+6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2020)03-0054-11

引文格式: 王雅慧, 彭祚登, 李云. 豫西浅山区不同世代刺槐林土壤养分与结构特征 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(3): 54-64. Wang Yahui, Peng Zuodeng, Li Yun. Soil nutrient and structure characteristics of *Robinia pseudoacacia* in different generations in the shallow mountain areas of western Henan Province, central China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(3): 54-64.

Soil nutrient and structure characteristics of *Robinia pseudoacacia* in different generations in the shallow mountain areas of western Henan Province, central China

Wang Yahui¹ Peng Zuodeng¹ Li Yun²

(1. School of Forestry, Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. School of Biological Sciences and Biotechnology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

收稿日期: 2019-09-19 修回日期: 2019-10-18

基金项目: 国家重点研发课题“刺槐速生建筑材料高效培育技术研究”(2017YFD0600503)。

第一作者: 王雅慧。主要研究方向: 用材与能源林培育理论与技术。Email: wyhzemail@126.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学。

责任作者: 彭祚登, 博士, 副教授。主要研究方向: 城市森林培育理论与技术, 林木种苗培育理论与技术。Email: zuodeng@sina.com 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

Abstract: [Objective] Exploring the impact of tree on site quality is an important research field to sustainable management of plantations. Studying the soil structure and nutrient changes of *Robinia pseudoacacia* plantations during the process of multi-generation replacement management can provide theoretical basis for formulating control measures on soil fertility under the multi-generation management object of *Robinia pseudoacacia* plantations. [Method] In this study, the comparison research in soil nutrients and structure characteristics was carried out on 1–3 generations of *Robinia pseudoacacia* forest and non-forest land of the same age in the shallow hilly area of western Henan Province, central China. [Result] (1) The content of soil nutrients in the second generation *Robinia pseudoacacia* woodlands was significantly higher than that in the first generation one ($P < 0.05$). In the topsoil layer (0–5 cm), the contents of organic matter, total nitrogen, and nitrate nitrogen in the second generation woodlands increased by 94.0%, 91.0% and 169.4%, respectively, increased by 82.77%, 61.14%, and 343.35%, respectively in the 10–20 cm deep soil layer, and increased by 53.25%, 21.60% and 556.20%, respectively in the 40–60 cm deep soil layer compared with those in the first generation woodlands. The total nitrogen content in each soil layer was 0.63, 0.39, 0.29 and 0.28 g/kg from the surface to deep layer for 1st generation *Robinia pseudoacacia* forestland. Totally, there was no significant difference in soil nutrient content between the second and third generation of *Robinia pseudoacacia* woodlands. The contents of organic matter, total nitrogen and total phosphorus in the first generation *Robinia pseudoacacia* woodlands was all significantly lower than that in the control land ($P < 0.05$), while the content of nitrate nitrogen in the control land was significantly lower than that in the first generation woodlands ($P < 0.05$). Nutrient content in the surface soil layer was higher than that in the deeper layer, and with generation increasing, the increment of nutrient content in the upper layer was greater than that in the deeper layer. From the perspective of stoichiometry, in each soil layer, C/P and N/P in the first generation woodlands were higher than those in the second and third generation woodlands. Compared with organic matter and total nitrogen contents, C/N value was relatively stable with generation increasing. C/P and N/P in the deeper soil layer were relatively stable. C/P showed a stronger increase compared with N/P in the topsoil layer and 10–20 cm deep soil layer from the the first generation forest to the third generation forest. (2) In terms of soil structure reflected by soil bulk density, porosity and aggregates, non-capillary porosity at the depth of 10–20 cm in the second generation and third generation woodlands increased by 11.4% and 21.4%, respectively compared with the first generation woodlands. It also showed an upward trend at the depth of 40–60 cm with generation increasing. The deeper the soil layer was, the greater the change range of soil bulk density was among intergenerational forestlands. Except for the surface layer, generally the soil density showed a decreasing trend in the other layers with generation increasing. The quantity and stability of soil surface water stable aggregates were in the order of control land > second and third generation woodlands > first generation woodlands. On the whole, in terms of soil structure, the surface layer was superior to the deeper layer, and the second and third generation woodlands were superior to the first generation woodlands. (3) Principal component analysis based on soil nutrients and structural property indicated that forest had a significant effect on the deeper soil. The soil conditions in the second and third generation woodlands were significantly better than those in the first generation woodlands. The surface soil properties in the second generation woodlands were better than those in the third generation woodlands, while the deeper soil properties in the third generation woodlands were better than those in the second generation woodlands. [Conclusion] In the shallow mountain area of western Henan Province, the management generation replacement of *Robinia pseudoacacia* forest has a significant impact on soil nutrients and structure. During the management process from the first generation forest to the second generation forest, soil structure is improved significantly. In addition, the soil nutrient content increases significantly, and the increment in the surface layer is greater than that in the deeper layer, and the soil structure is improved during the process. The soil nutrients and structure in the third generation forest remain relatively stable. In the process of generation increasing, carbon accumulates faster than

nitrogen, and the supply capacity of carbon and nitrogen is smaller than that of phosphorus. Besides, the problem of soil nutrient imbalance becomes serious during the process of generation replacement.

Key words: *Robinia pseudoacacia*; hilly region in western Henan Province; soil nutrient; soil structure; different generations of plantation

许多人工林具有生长速度较快、生长量大、主导生态功能显著等优势,但往往也带来林分结构简单、抗性差、地力维持能力差等问题^[1-2]。围绕林业可持续经营,森林对立地生产力的影响等方面的研究是人工林研究的重要方向^[3]。已有的研究表明,不同林分及立地条件会产生不同的结果。杨玉盛等^[4]发现三代杉木表层土壤孔隙度、通气性和容蓄能力均有下降。桉树长期种植也会有肥力下降,林下植物多样性减少的现象^[5]。Kirschbaum等^[6]发现辐射松林下土壤碳氮养分的巨大消耗;而张社奇等^[7]对黄土高原的刺槐林养分时空效应的研究得到刺槐林有效改善了土壤养分状况的结论。吴平等^[8]对喀斯特地区3种人工林对土壤理化微生物性质的研究得出刺槐滇柏混交优于各纯林及未造林地的结论;王春梅等^[9]发现长白落叶松土壤有机质随退耕还林时间先降低后增加,与其相似,王艳芳等^[10]发现不同林龄的栎类和侧柏人工林下土壤碳氮储量随林龄的增加变化趋势表现为先减少后增加再减少。因此刺槐人工林长期生产经营是否使林地土壤改善还是退化是值得去研究的。

刺槐(*Robinia pseudoacacia*)原产北美阿巴拉契山脉和欧扎克高原,喜湿、喜肥又耐干旱瘠薄,具有较强的适应性和抗逆性。是我国北方地区引种历史较长,已乡土化的主要造林树种。河南省洛宁县于20世纪六七十年代开始引种刺槐于朝鲜^[11],造林约3万hm²,作为该县的主要造林树种,目前经历多次砍伐利用,形成了多代的萌蘖更新人工林,生长优良,但多代刺槐林地与地力的关系如何还是个未知数。

土壤结构,如土壤团聚体、密度、孔隙度等在调节土壤养分、维持地力上具有重要作用,而且与土壤抗侵蚀性能密切相关^[12]。目前,刺槐林在矿区复垦、退耕还林、荒山造林、水土保持中作为改善生态环境的人工林而被大量营造,在此过程中,人们进行了大量有关刺槐对土壤影响的研究^[13-16],其中包括土壤的理化性质、酶活性、微生物群落等。但是在刺槐用材林经营中,对不同经营周期的林地地力变化特征的研究还很少,刺槐林经过皆伐、萌蘖、再皆伐、再萌蘖过程可能对土壤环境有附加影响的。本研究以河南省洛宁县浅山丘陵区的刺槐林为试验对象,选取相同林龄(地上部分)不同世代的林分,研究其林下土壤养分和结构的变化,为刺槐人工林多代经营下

的土壤地力调控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究地点位于洛宁县国有吕村林场(111°15′~111°35′ E、34°20′~34°32′ N)。洛宁县地处豫西山区,是黄土高原的边缘地带,属崤山南部,崤山为秦岭余脉,山体多皱褶。样地地层为新生界第四系中更新统和中远古界长城系,地貌类型为黄土塬、黄土丘陵。地带性植被为温带落叶阔叶林。该区域属于大陆季风性气候,年平均气温13.9℃,日照2006h,年平均无霜期212d,年均降水量568mm^[17]。试验地土壤为幼褐土,母质为黄土。本地区刺槐初始造林密度皆约为1.5m×2m,后经过砍伐萌蘖和自然稀疏后长成不同密度的萌蘖林,会出现一簇多棵的现象。按前人研究的分类^[18-19],试验地坡向皆为半阴坡,上坡位。按坡度、海拔尽可能相近的原则,选取了3个不同世代的刺槐人工林地以及一块荒坡草地(对照)作为研究对象,实生苗造林形成的林分为一代林,一代林皆伐后萌蘖形成二代林,二代林皆伐后萌蘖形成三代林(轮伐期15~20年),对照地未造林过,为灌木草地。每个世代林分及对照分别设置3个20m×20m的样地,进行样地调查,样地具体信息见表1。各样地土壤质地经机械组成均为壤质粘土。

样地内主要林下植物为一代林地:荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)、酸枣(*Ziziphus jujuba* var. *spinosa*)、野蔷薇(*Rosa multiflora*)、黄花蒿(*Artemisia annua*)、抱茎小苦苣(*Crepidiastrum snochifolium*)、泥胡菜(*Hemisteptia lyrata*)、野豌豆(*Vicia sepium*);二代林地:黄花蒿、野蔷薇、翅果菊(*Lactuca indica*)、紫堇(*Corydalis edulis*)、夏至草(*Lagipsis supina*)、泥胡菜、蒲公英(*Taraxacum mongolicum*);三代林地:野蔷薇、绢毛匍匐委陵菜(*Potentilla reptans* var. *sericophylla*)、抱茎小苦苣、附地菜(*Trigonotis peduncularis*)、紫堇、夏至草、蒲公英;对照地:荆条、蒲公英、翅果菊、附地菜、蒺藜(*Tribulus terrestris*)。

1.2 样品的采集与处理

2018年4—5月,在每个样地内设置3个土壤剖面,根据《LY/T1958—2011森林可持续状况评价导则》土壤分层,枯落物层A、腐殖质层B、淀积层C,

表 1 样地基本信息

Tab. 1 General situation of sample plots

样地编号 Sample plot No.	林龄/a Stand age/year	地理坐标 Geographical coordinate	海拔 Altitude/m	坡度 Slope/(°)	胸径 DBH/cm	树高 Tree height/m	pH	含水率 Soil water content/%
YL	9	34°29'02"N, 111°28'53"E	760	22	4.84	5.40	7.14	16.80
EL	10	34°25'30"N, 111°27'60"E	660	20	6.87	8.85	7.06	14.87
SL	10	34°22'29"N, 111°31'55"E	730	16	5.22	8.15	7.14	15.62
CK		34°25'34"N, 111°29'49"E	670	13			7.14	16.60

注: YL, 茶沟村的一代林; EL, 六道头的二代林; SL, 伙子村的三代林; CK, 湾凹的对照荒坡。下同。Notes: YL, first generation forests in Chagou Village; EL, second generation forests in Liudaotou; SL, third generation forests in Huozi Village; CK, wastelands in Wan'ao. The same below.

实际取样中对应深度为去除地被物的表土层 0 ~ 5 cm, 10 ~ 20 cm, 40 ~ 60 cm, 60 ~ 80 cm 层(避开 20 ~ 40 cm 存在的过渡层), 取环刀样和适量土样, 进行土壤密度、土壤机械组成等的测算。同年 10 月, 在每个样方内随机多点采集原状土, 除去地被物, 放入硬质塑料盒中带回实验室, 进行初步处理后测定机械组成。根据每木检尺得到的数据, 在每个样方内选取两株平均标准木, 在标准木的南北方位距离植株 50 cm 处挖土壤剖面, 按土层深度自下而上取得土样放入自封袋, 均匀混合后室内自然风干, 除杂质, 研磨过 2 mm 孔径筛、取部分过 2 mm 筛的土再研磨过 0.149 mm 孔径筛, 用于各项土壤养分指标的测定。

1.3 测定方法

水稳性土壤团聚体的测定参考沙维诺夫法, 干筛法测定出各径级团聚体百分比后, 按比例配出 50 g 土样(< 0.25 mm 的土壤不参与湿筛, 只进行计算), 在水稳性团聚体分析仪上进行湿筛(筛子孔径分别为 2、1、0.5、0.25 mm), 快速润湿, 以上下振幅 4 cm, 频率 40 次/min, 振动 15 min 后将各级水稳性团聚体风干后进行称量; 土壤机械组成的测定采用沉降吸管法, 土壤质地分类采用国际制土粒分级标准; 土壤 pH 值采用酸度计法(水土比 2.5:1); 土壤有机质用 H₂SO₄-K₂CrO₄ 外加热法; 土壤密度、孔隙度的测定采用环刀法; 全氮用凯氏定氮法; 全磷用酸溶-钼锑抗比色法; 硝态氮用氯化钙浸提-分光光度计法; 有效钾用浓硝酸浸提-火焰光度计法。

1.4 数据分析

计算 > 0.25 mm 水稳性团聚体含量($C_{>0.25}$)、团聚体破坏率(PAD)、平均质量直径(MWD)、平均几何直径(GWD)

$$C_{>0.25} = \frac{M_{>0.25}}{M_T} \quad (1)$$

$$PAD = \frac{DM_{>0.25} - M_{>0.25}}{DM_{>0.25}} \quad (2)$$

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i \times w_i \quad (3)$$

$$GWD = \exp \frac{\sum_{i=1}^m w_i \ln \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (4)$$

式中: $DM_{>0.25}$ 为 > 0.25 mm 非水稳性团聚体的质量; $M_{>0.25}$ 为 > 0.25 mm 水稳性团聚体的质量; M_T 为团聚体总质量; \bar{x}_i 为每一组粒径组分的平均直径(mm); w_i 为某一粒径组分团聚体质量与总团聚体质量的比重。

分形维数(D)的计算采用 Tyler^[20] 等提出的针对土壤分形的公式:

$$\frac{M(r < R)}{M_T} = \left(\frac{R}{R_L} \right)^{3-D} \quad (5)$$

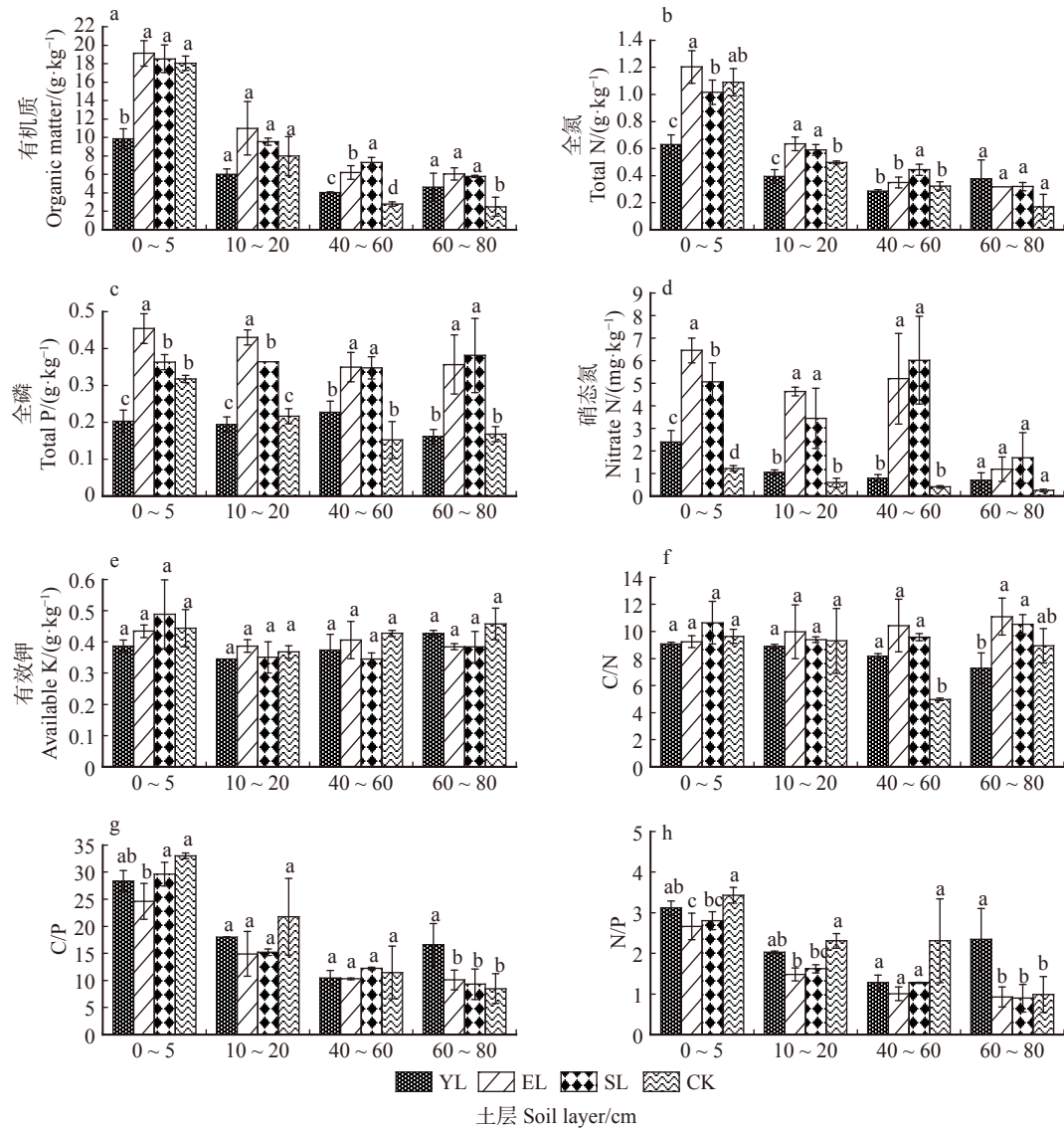
式中: R 为某一级水稳性团聚体平均直径, 即两筛孔径的平均值; R_L 为水稳性团聚体最大粒径(mm); $M(r < R)$ 为粒径小于 R 的水稳性团聚体质量(g)。

用 Excel2010 和 SPSS18.0 对数据进行处理和分析, 利用单因素方差分析和最小显著差法($\alpha = 0.05$)进行显著性检验, 用 PCA 主成分分析进行得分排序, 用 Origin2018 软件作图。

2 结果与分析

2.1 各世代刺槐林土壤养分分布特征差异

由图 1a ~ e 可看出, 在各土层, 只有有效钾含量在各样地间差异不显著($P > 0.05$), 意味着多代经营有效钾含量未改变。从一代林到三代林再到对照地, 土壤有机质、全氮、全磷、硝态氮几种养分含量总体均呈现出先上升后下降的规律, 二、三代林地显著高于一代林地。表层土壤养分含量高于深层, 且随世代的增加养分含量在上层土壤的增量大于深层土壤, 表现为二、三代林地的表层土与一代林地的表层土的养分含量的比值大于深层土的二者之比。在表土层(0 ~ 5 cm)中, 二、三代林地全氮含量分别是一代林地的 1.9 倍、1.61 倍; 在 10 ~ 20 cm 土层, 分别是 1.61 倍、1.49 倍; 在 40 ~ 60 cm 层, 分别是 1.21 倍、



不同字母表示同一土层各样地间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Different letters indicate significant differences among different sampling sites in same soil layer at $P < 0.05$ level. The same below.

图1 不同世代刺槐林土壤养分含量的比较

Fig. 1 Comparison in soil nutrient contents in *Robinia pseudoacacia* plantations of different generations

1.54倍;在60~80 cm层差异不显著,即随土层深度的增加,比值降低。

土壤有机质(图1a)含量在土层10~20 cm、60~80 cm处差异未达到显著,从数值上看,在表土层、10~20 cm、40~60 cm处,二代林地有机质含量分别为19.12、11.00、6.20 g/kg,相比于一代林地分别增加了94.0%、82.8%、53.2%,三代林地分别为18.52、9.54、7.31 g/kg,相当于一代林地分别增加了87.9%、58.5%、80.6%,深层土壤中各世代刺槐林地与对照地有机质含量的差异体现了植物对土壤养分返还的作用。

图1b中各样地土壤全氮含量在表土层、10~20 cm、40~60 cm处有显著差异($P < 0.05$),按表土层、10~20 cm、40~60 cm的顺序,一代林地土壤全氮含量为0.63、0.39、0.29 g/kg,二代林地全氮含量相

比于一代林地分别增加了91.0%、61.1%、21.6%,三代林地相较于一代林地分别增加了61.4%、49.8%、54.4%;在60~80 cm层各样地土壤全氮含量差异不显著($P > 0.05$)。在本研究的试验地中,土层深达40 cm以上时,刺槐根系已经大幅度减少。一代林地全氮含量在全土壤层相对其他样地变化幅度较小,变异系数为35.09%,其他样地变异系数分别为65.6%、51.3%、77.3%。各样地上层土壤氮含量差明显大于深层土壤的氮含量差,说明刺槐林代际更替过程中氮素在林木和土壤交流较为密切的上部土壤有更多的积累。

图1c可看出全磷含量在各土层样地间有显著差异($P < 0.05$),二、三代林地显著高于一代林地。各样地间和各土层间的变异系数按照一代林、二代林、三代林、对照、表土层、10~20 cm层、40~

60 cm 层、60~80 cm 层的顺序分别为 14.0%、13.2%、3.7%、34.9%、31.3%、38.0%、36.0%、44.56%，说明刺槐林分对磷素以消耗为主，表土层消耗量比深层大。硝态氮(图 1d)作为一种速效氮，整体上对照地含量最低，二、三代林地显著高于一代林地 ($P < 0.05$)，在表土层分别增加了 169.4%、111.5%，在 60~80 cm 层各样地之间差异未达到显著 ($P > 0.05$)。样地范围内硝态氮、有机质、全氮含量变异系数分别为 85.7%、62.4%、57.2%，均远高于同尺度下土壤空间变异程度，说明刺槐人工林代际更替过程中对土壤养分的积累作用。

研究地 C/N、C/P、N/P 变化范围为 4.98~11.09、8.48~32.99、0.90~3.43。图 1f 中各样地土壤 C/N 在深层土壤中有差异，表现为二、三代林地高于一代林地和对照地，在各样地表土层和 10~20 cm 土层处无显著差异 ($P > 0.05$)。一代林地到对照地其值分别为 7.28~9.08、9.24~11.09、9.39~10.65、4.99~9.64，图 1g 中 C/P 在土层 10~20 cm、40~60 cm 处差异不显著，在表土层中三代林地和对照地显著高于二代林地，一代林地与二、三代林地间无显著性差异，在土层 60~80 cm 处，一代林地的 C/P 显著高于其他样地。图 1h 中 N/P 值在 40~60 cm 层处差异不显著 ($P > 0.05$)，在其他土层均表现为二、三代林地低于一代林地和对照地。

一代林地的 C/P、N/P 表现出高于二、三代林地说明世代更替过程中碳氮的供应能力小于磷。相比于有机质和全氮含量，随世代增加过程中 C/N 值较为稳定，深土层的 C/P 与 N/P 较稳定，在表土层和 10~20 cm 土层处的一代林到三代林地 C/P 与 N/P 的比值分别为 9.08、9.24、10.56、8.88、10.07、9.38，表现出随世代增加 C/P 的增加大于 N/P 的增加的趋势，说明刺槐多代经营过程中，碳素比氮素增加的速度快。

2.2 各世代刺槐林土壤结构性特征

2.2.1 不同世代林分土壤密度及孔隙度

由表 2 可看出，土壤密度在各样地的表土层中均无显著性差异 ($P > 0.05$)，在土层 10~20 cm、40~60 cm、60~80 cm 处随世代的增加总体呈下降的趋势，但有波动，土层越深各世代土壤密度变化幅度越大，在土层 10~20 cm 处三代林地相比于一、二代林地分别下降了 1.3%、3.3%；在土层 40~60 cm 处下降了 7.0%、8.2%；在 60~80 cm 处下降了 6.5%、7.1%，说明林分对土壤密度的下降起到了促进作用。人为活动，如翻土、皆伐等对表层的干扰较大，但并未产生显著的恶化影响，从数据上看对照地表面土的孔隙度高于有林地，而深层土没明显增加也说明了这

表 2 不同土层各样地土壤密度及孔隙状况

Tab. 2 Soil bulk density and porosity in different soil layers of each sample plot

土层 Soil layer/cm	样地 Sample plot	土壤密度 Soil bulk density/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	毛管孔隙度 Capillary porosity/%	非毛管孔隙度 Non-capillary porosity/%
0~5	YL	1.51 ± 0.04a	36.83 ± 1.25a	4.11 ± 1.16a
	RL	1.38 ± 0.11a	34.78 ± 1.31a	7.43 ± 1.39a
	SL	1.50 ± 0.04a	35.47 ± 0.48a	5.92 ± 2.52a
	CK	1.50 ± 0.11a	36.67 ± 2.04a	8.60 ± 6.61a
10~20	YL	1.52 ± 0.04ab	37.83 ± 1.51a	3.60 ± 1.08b
	RL	1.55 ± 0.03a	35.46 ± 0.88b	4.01 ± 1.58ab
	SL	1.50 ± 0.03b	35.80 ± 1.87b	4.37 ± 0.94a
	CK	1.52 ± 0.03a	35.27 ± 0.91b	4.97 ± 0.44a
40~60	YL	1.57 ± 0.03a	38.37 ± 2.70a	2.30 ± 0.81b
	RL	1.59 ± 0.05a	36.52 ± 1.96a	2.95 ± 0.95a
	SL	1.46 ± 0.03b	38.75 ± 2.38a	3.45 ± 0.61a
	CK	1.58 ± 0.05a	38.22 ± 2.37a	2.67 ± 0.43ab
60~80	YL	1.54 ± 0.05b	40.13 ± 1.85a	3.43 ± 1.47a
	RL	1.55 ± 0.06ab	38.09 ± 1.65b	3.36 ± 1.88a
	SL	1.44 ± 0.02c	39.54 ± 1.29ab	3.37 ± 0.82a
	CK	1.60 ± 0.02a	40.64 ± 1.67a	3.44 ± 1.35a

注:表中数据为平均值 ± 标准差。同列不同字母间代表差异显著 ($P < 0.05$)。Notes: data in table are mean ± SD. In the same column, different letters represent significant differences ($P < 0.05$).

一点。毛管孔隙度在表土层和 40~60 cm 层差异不显著，但随世代增加有下降趋势。非毛管孔隙度在表土层差异不显著，在土层 10~20 cm 处，二代林、三代林、对照地相比于一代林分别增加了 11.4%、21.4%、38.0%，在 40~60 cm 处随世代增加呈上升趋势，在 60~80 cm 处差异不显著 ($P > 0.05$)，因此，刺槐人工林皆伐疏伐等人为活动会对土壤结构造成破坏，但是刺槐林及其组成的林下环境、土壤中的根系对这种破坏有改善和维持的作用。

2.2.2 不同世代林分表土层土壤团聚体稳定性和机械组成特征

表土层是水土保持效应中最主要的土壤层，土壤团聚体是土壤养分、抗侵蚀能力的决定性因子之一。由表 3 可看出，表土层(0~5 cm)土壤水稳性团聚体含量随经营世代增加而增加，二、三代林地、对照地土壤团聚体含量比一代林地分别高 36.7%、40.4%、45.4%，一代林地显著低于其他 3 个样地 ($P < 0.05$)。平均重量直径和平均几何直径趋势相同，一代林地显著低于其他样地 ($P < 0.05$)。团聚体破坏率随世代增加而减小，一、二、三代林地分别为 54.4%、35.0%、35.67%，二、三代林地间差异不显著。水稳性团聚体分形维数 D 值越大，土壤结构稳定性越差(确

表3 表层土壤水稳性团聚体各指标及机械组成

Tab. 3 Indexes of soil water-stable aggregates and soil mechanical composition in the surface soil

样地 Sample plot	$C_{>0.25}/\%$	PAD/ $\%$	MWD/mm	GMD/mm	D	砂粒 Sand/ $\%$	粉粒 Silt/ $\%$	黏粒 Clay/ $\%$
YL	44.11 ± 3.17b	54.37 ± 3.24a	1.35 ± 0.06b	0.40 ± 0.01b	2.84 ± 0.02a	32.38 ± 0.13a	32.08 ± 0.29b	33.40 ± 0.47ab
EL	60.32 ± 3.26a	35.03 ± 3.72b	2.00 ± 0.27a	0.67 ± 0.11a	2.76 ± 0.02a	25.28 ± 2.88b	39.12 ± 3.21a	31.12 ± 0.26b
SL	61.93 ± 5.61a	35.67 ± 5.50b	2.21 ± 0.51a	0.76 ± 0.23a	2.74 ± 0.04a	28.40 ± 0.34ab	35.29 ± 0.07ab	33.09 ± 0.02b
CK	64.14 ± 3.77a	33.78 ± 3.71b	2.38 ± 0.24a	0.85 ± 0.13a	2.72 ± 0.03b	29.34 ± 1.38a	33.51 ± 0.78b	35.95 ± 1.96a

注: $C_{>0.25}$: 直径 > 0.25 mm 水稳性团聚体含量; PAD: 团聚体破坏率; MWD: 平均质量直径; GMD: 平均几何直径; D : 分形维数。Notes: $C_{>0.25}$, water-stable aggregate content with diameter > 0.25 mm; PAD, percentage of aggregate destruction. MWD, mean mass diameter; GMD, mean geometric diameter; D , fractal dimension value.

定系数 R^2 均大于 0.95), 分形维数 D 随世代增加呈减小的趋势, 变化量很小, 在一代林到三代林间差异未达到显著 ($P > 0.05$), 对照样地显著小于各有林地。另外, 虽然正常情况下土地利用的变化不会产生太大的土粒比例的变化, 但是有很多研究发现人工林的种植会改变土壤的机械组成, 如整地改变了土壤颗粒比例、表土侵蚀而被运输等^[21-22]。本研究中的一代林地中砂粒含量较高, 可能是因为一代林地地被物较少, 团聚体稳定性较低, 导致土壤粉粒, 黏粒随水向深处或下坡位流失较多, 各样地不同粒径的比例表明该地原始土壤质地相同。

2.3 土壤养分和密度、孔隙的主成分得分排序

对通过方差分析及显著性检验的指标进行主成分分析, 并按照土壤属性分别进行得分排序^[23]。因参评的土壤指标不多, 不考虑数据冗余的问题, 主要为能够进行综合指标得分排序。按累计贡献率 > 85% 的原则抽取主成分(见表 4), 通过 KMO (> 0.6) 和 Bartlett 球形检验 (< 0.05), 所有指标的信息提取度均大于 75%, 同时把逆指标进行正向化处理。养分指标得分排序在土层上的区分很明显(见表 5), 以 CK-2 为中间值, 得分大于 0 的全为表土层(0 ~ 5 cm)和 10 ~ 20 cm 层, 说明表层土壤养分优于深层土壤。从养分得分排序上看, 表土层为二代林地 > 对照地 > 三代林地 > 一代林地, 10 ~ 20 cm、40 ~

60 cm 土层处为二、三代林 > 对照地 > 一代林地, 土层 60 ~ 80 cm 处有林地均高于对照地, 为三代林地 > 一代林地 > 二代林地 > 对照地。表土层土壤结构指标得分排序趋势同于养分指标, 土层 10 ~ 20 cm 处三代林地高于对照地, 土层 40 ~ 60 cm 处是三代林地 > 二代林地 > 一代林地 > 对照地, 在土层 60 ~ 80 cm 处是三代林地 > 一代林地 > 二代林地 > 对照地, 有林地均高于对照地, 说明深层土壤性质的改善来源于植物, 人为活动对表层土壤有破坏作用。

表5 各样地不同土层土壤质量指数排序

Tab. 5 Sorting of soil quality index of different soil layers in varied sample plots

A		B	
土样编号 Soil sample No.	得分 Score	土样编号 Soil sample No.	得分 Score
RL-1	1.40	RL-1	2.00
CK-1	1.37	CK-1	1.07
SL-1	1.21	SL-1	0.59
YL-1	0.01	SL-4	0.45
RL-2	0.08	SL-3	0.32
SL-2	0.03	SL-2	0.26
CK-2	0.00	CK-2	0.23
SL-3	-0.22	YL-1	0.00
RL-3	-0.26	YL-2	-0.16
YL-2	-0.30	RL-2	-0.24
YL-4	-0.36	YL-4	-0.47
CK-3	-0.54	RL-4	-0.48
SL-4	-0.66	RL-3	-0.86
RL-4	-0.67	YL-3	-0.88
YL-3	-0.68	CK-3	-0.89
CK-4	-0.97	CK-4	-1.02

注: 土样编号为“样地-土层”, 1 为表土层(0 ~ 5 cm), 2 为 10 ~ 20 cm 层, 3 为 40 ~ 60 cm 层, 4 为 60 ~ 80 cm 层。Notes: soil sample is presented as sample plot-soil layer, 1 means surface soil layer (0~5 cm), 2 means 10~20 cm deep soil, 3 means 40~60 cm deep soil, 4 means 60~80 cm deep soil.

表4 主成分分析的特征根及其贡献率

Tab. 4 Eigenvalue and its contribution rate in principal components analysis

类别 Type	主成分 Principal component	特征根值 Eigenvalue	贡献率 Contribution rate/ $\%$	累积贡献率 Cumulative contribution rate/ $\%$
A	1	2.986	74.64	74.64
	2	0.768	19.20	93.84
B	1	1.982	66.06	66.06
	2	0.672	22.40	88.46

注: A: 土壤养分指标; B: 土壤密度和土壤孔隙度指标。下同。Notes: A, soil nutrient index; B, soil bulk density and soil porosity index. The same below.

3 讨 论

一般皆伐的人工林连栽会带来土壤养分的损耗,特别是短轮伐期树种,如马尾松、杉木、杨树等^[24],但本研究区域刺槐林多代经营整体上有利于林地土壤性质的改善和维持。二代林地相较于一代林地土壤质量有明显的提升,三代林与二代林地差异很小,起到了维持作用。首先,相较于一般短轮伐期人工林,该地刺槐人工林轮伐期较长(15~20年),林分更替时并未采用一般的皆伐炼山,而是保留根桩进行萌蘖更新,降低了皆伐对立地养分和水土流失的影响。其次,刺槐为阔叶树,枯落物积累较多,作为豆科树种根瘤具有固氮增肥作用。另外,刺槐属浅根性树种,通过对根系的研究,发现根系具有“簇生,密集”的特点,对于水土保持、根系与立地土壤养分交流具有促进作用。该地区土壤本身较为贫瘠,是否对于植物的功能性有所提升,也是今后要研究确定的。本试验样地所处的浅山区坡度较为平缓,养分和水土流失较少。最后,本研究中一代林种植年限较短,在栽植时对土壤造成的破坏还没有得到很好的改善,而二、三代林地表土层土壤质量相较于对照地,主要是结构性上表现较差,而深层土壤性质优于对照地,二、三代林间差异不大,这都表明即使有人为干扰带来的破坏,刺槐人工林多代经营整体上也能改善和维持土壤质量。

本研究中刺槐林多代经营对土壤有机质等养分的积累有促进作用。植物对土壤养分的积累影响很大,而皆伐、疏伐等人为活动也会对林地土壤性质产生很大的影响,但本研究中深层土的结果排除了人为的干扰,表层土在综合干扰后总体上仍然向着养分积累的方向进行。造林对土壤养分积累或消耗取决于造林地环境条件和林木生长实践过程,所以各种研究结果不统一,本研究中二、三代林地状况显著好于一代林地,二、三代林地之间相比是有波动的(表5),但由于目前关于刺槐生长衰退机制尚不清楚^[25],其原因可能是刺槐林长势衰退导致可积累的养分少了,土壤养分状况的好坏又影响着林木生长,而林木生长反过来影响土壤的性质和养分状况^[26],也可能是因为三代林地的微生物分解作用较高^[14],因此需要进一步研究土壤微生物情况。土样采集时间为生长季末,因此用硝态氮来反映土壤速效氮含量。本研究中二、三代林地中硝态氮含量远高于一代林地,表现了刺槐对土壤养分的促进作用,一代林地可能是因为土壤结构较差,通气通水性较差,有机质含量低(硝化细菌的碳来源),硝化作用较弱,不利于土壤硝态氮的累积^[27]。

本研究结果与黄土丘陵区 C/N 变化范围 5.65~12.57 相近, C/P、N/P 则远高于黄土丘陵区 C/P、N/P 范围,分别为 3.62~17.32、0.43~1.38^[28],但也低于国内土壤平均值(C/P、N/P 分别为 52.7、3.9)^[29]。从化学计量学的角度分析,与有机碳和全氮相比, C/N 较为稳定,这与有研究中指出的生态系统中土壤 C/N 比相对稳定的结果相同^[30]。碳氮养分的增长量没能保持一直较高的增长,所以即使刺槐对立地土壤的碳氮养分有大量的归还,本研究中试验地碳氮元素的供应能力也是小于磷的,这可能也是三代林地刺槐胸径树高小于二代林的原因之一。

土壤密度和孔隙度都反映了土壤的紧实度、通气状况、水分储蓄量等物理性质。本研究与植被恢复可以显著降低土壤密度^[31]的结论大体一致,对照地密度较高,三代林地最低,虽然各样地表土层间无显著性差异,但是深土层变化幅度大,表明是皆伐和疏伐时对土体的夯实对表土的影响更大导致的,体现了植物对土体的作用,所以不同于单纯的植被恢复对土壤的影响。对照地的毛管孔隙度较高是因为所含黏粒多^[32],土壤黏粒含量显著高于有林地,在表土层和 40~60 cm 层差异不显著,在 10~20 cm 和 60~80 cm 处都是一代林地值最高,从数值上来看,从一代林到三代林地各土层的变化都是下降再升高,而对应的黏粒含量变化并非如此,说明是根毛或者有机质的作用。非毛管是直径大于 0.1 mm 的大孔径,有所增高可能是根系或者动物的作用(因为表现为表层有增加,深层没明显变化)。结构良好的耕地土壤密度在 1.0~1.3 g/cm³ 之间,非毛管孔隙度在 10% 以上,大小孔隙之比在 1:2 至 1:4 的范围^[31],因此样地整体土壤都较为紧实。

土壤侵蚀和水肥流失首先发生在土壤表层,因此表层土壤的团聚体稳定性极为重要。大团聚体含量越高, MWD 值越高;团聚体稳定性越好, GMD 值越高^[33],分形维数 D 值越低,抗侵蚀性越强,依次为对照地,三代林地,二代林地,一代林地。分析其原因为:多年生草本根系强大,伸展和挤压可将大土块破碎成小的结构体,根系分泌物和死亡后形成的腐殖质都能促进土壤结构的改善^[31,33],对照地地表为草被和零星灌木,根团密集且没有人为干扰,整地和修枝疏伐等措施对有林地土壤团聚体结构有破坏作用。目前对于人工林种植后团聚体含量及稳定性变化的研究结果大体分为两种,种植年限的增加有利于团聚体胶连物质的积累,土壤有机碳是重要的胶结剂之一,有利于团聚体的形成及稳定;随种植年限的增加团聚体稳定性先增加后降低,主要是后期人为的干扰对团聚体的破坏占了主要作用^[34]。所以本

研究中表土层团聚体含量及稳定性的结果为对照地大于有林地,但随着世代的增加团聚体性质在改善。植物的根系活动对土壤结构状况有很大的影响,刺槐为浅根性树种,表土根系比较密集,利于团聚体的形成与改良。

当然,尽管样地选择上控制了变量,受条件限制在地形因子上还是存在一些差异,但是根据目前空间尺度上研究土壤变异是主要根据地统计学分析,涵盖土壤空间分布上的非均一性差异,包括系统变异和随机变异(误差),其中系统变异可主要分为自然条件和人为的差异。对小流域土壤养分空间变异特征的研究表明,同质地区不同土地利用类型是土壤大部分养分含量变异的主要来源^[19,28],还有研究表明森林生态系统土壤有机碳库的变化是主要取决于植被^[35]。本研究中表层土养分含量差异远大于深层土也印证了这一点。同时,试验样地地形因子差异远远小于全空间尺度差异。以正北为零,顺时针的角度为原始度数,把角度正弦化和余弦化分别表示朝东和朝北的程度量化^[36],和坡度、海拔与土壤养分物理性质进行相关分析(同层)。表6中只有土壤黏粒与海拔在 $\alpha = 0.05$ 的水平下相关性显著,其他均相关性不显著,说明本试验地的地形因子对土壤性质影响不明显,而且各地形因子无定向规律性,而土

表6 样地土壤物理性质与定量地形因子的相关性分析

Tab. 6 Correlation analysis between soil properties and several quantitative terrain factors in the sample plots

因子 Factor	坡向 Slope aspect (Sin)	坡向 Slope aspect (Cos)	坡度 Slope degree	海拔 Altitude
全磷 Total P	0.517	-0.43	-0.577	-0.05
全氮 Total N	0.409	-0.351	-0.444	-0.235
有机质 Organic matter	0.468	-0.419	-0.426	-0.275
NO ₃ -N	0.219	-0.17	-0.241	0.286
有效钾 Avalibale K	0.411	-0.393	-0.263	-0.279
砂粒 Sand	-0.449	0.401	0.443	0.403
粉粒 Silt	0.23	-0.191	-0.249	0.028
黏粒 Clay	0.474	-0.447	-0.413	-0.731*
土壤密度 Soil bulk density	-0.111	0.052	0.3	-0.069
毛管孔隙度 Capillary porosity	-0.663	0.578	0.668	0.337
非毛管孔隙度 Non-capillary porosity	0.478	-0.414	-0.551	-0.509

注: *表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。Note: * means significant correlation at the 0.05 level (bilateral).

壤肥力却表现出规律性。因此认为样地土壤性质的差异来源主要为土地利用类型,未来可以对土壤性质的空间变异性进行地统计学分析,以定量地确定变异来源。

土壤性质的演变是一个复杂的生态过程,本研究涉及的还不全面,如微生物、土壤酶的性质等。在土壤质量评价中只在3个世代的时间尺度上进行了研究,忽略了刺槐不同林龄对土壤的影响作用的不同,据此或许可以找到更适宜的更新采伐年龄,都是之后需要深入研究的。

4 结 论

(1)刺槐林经营世代更替过程中,一代林到二代林土壤养分含量显著增加,到三代林维持相对稳定。在表土层中,全氮、有机质、硝态氮含量分别增加了91.0%、94.0%、169.4%,在10~20 cm层分别增加了61.14%、82.77%、343.35%,在40~60 cm层分别增加了21.60%、53.25%、556.20%。刺槐二代林和三代林土壤养分含量整体差异不显著。

(2)刺槐林地土壤表层养分含量高于深层,且随世代的增加养分含量在上层土壤的增量大于深层土壤,表现为二、三代林地的表层土与一代林地的表层土的养分含量的比值大于深层土的二者之比。

(3)在刺槐林世代增加过程中碳素比氮素积累的速度快,且碳氮的供应能力小于磷,代际更替过程中存在着养分失衡加重的问题。从化学计量学角度分析,各土层中一代林地的C/P、N/P都表现出高于二、三代林地。相比于有机质和全氮含量,随世代增加过程中C/N值较为稳定,深土层的C/P与N/P较稳定,在表土层和10~20 cm层的一代林到三代林地C/P与N/P的比值分别为9.08、9.24、10.56、8.88、10.07、9.38,从一代林到三代林,C/P的增幅大于N/P的增幅。

(4)一代林到二代林过程中土壤结构得到改善,到三代林维持相对稳定。从土壤密度、孔隙度、团聚体反映的土壤结构性看,非毛管孔隙度在10~20 cm层处,二代林地、三代林地相比于一代林地分别增加了11.4%、21.4%,在40~60 cm处也随世代增加呈上升趋势。土层越深各代际林间土壤密度变化幅度越大,除表土层外,土壤密度在其他各土层随世代总体呈下降趋势。各样地土壤表层水稳性团聚体数量及稳定性表现为对照地>二、三代林地>一代林地。从整体上看,土壤结构表层优于深层,二、三代林地优于一代林地。

(5)基于土壤养分与结构性质的主成分分析表明,多世代刺槐对深层土壤的作用明显,二、三代林

地土壤状况显著优于一代林, 二代林地的表层土壤性质优于三代, 深层土壤是三代优于二代。

参 考 文 献

- [1] 联合国粮食和农业组织. 2015 年全球森林资源评估报告 [R]. 罗马: FAO, 2015.
Food and Agriculture Organization of the United Nations. Global forest resources assessment 2015[R]. Rome: FAO, 2015.
- [2] 盛炜彤. 关于我国人工林长期生产力的保持[J]. 林业科学研究, 2018, 131(1): 1-14.
Sheng W T. On the maintenance of long-term productivity of plantation in China[J]. Forest Research, 2018, 131(1): 1-14.
- [3] 盛炜彤, 范少辉. 人工林长期生产力保持机制研究的背景、现状和趋势[J]. 林业科学研究, 2004, 17(1): 106-115.
Sheng W T, Fan S H. Study on the mechanism of maintaining long-term productivity of lantation: background, present condition and trends[J]. Forest Research, 2004, 17(1): 106-115.
- [4] 杨玉盛, 杨伦增, 俞新妥. 杉木林取代杂木林后土壤腐殖质组成及特性变化的研究[J]. 福建林学院学报, 1996, 16(2): 97-100.
Yang Y S, Yang L Z, Yu X T. Study on the change of soil fertility after replacement of miscellaneous woods in Nanping Creek[J]. Journal of Fujian College of Forestry, 1996, 16(2): 97-100.
- [5] 叶绍明, 温远光, 杨梅, 等. 连栽桉树人工林植物多样性与土壤理化性质的关联分析[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 246-250.
Ye S M, Wen Y G, Yang M, et al. Correlation analysis on biodiversity and soil physical & chemical properties of *Eucalyptus* spp. plantations under successive rotation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(4): 246-250.
- [6] Kirschbaum M U F, Guo L B, Gifford R M. Observed and modelled soil carbon and nitrogen changes after planting a *Pinus radiata* stand onto former pasture[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2008, 40(1): 247-257.
- [7] 张社奇, 王国栋, 张蕾. 黄土高原刺槐林对土壤养分时空分布的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(5): 91-95.
Zhang S Q, Wang G D, Zhang L. Time-space distributive feature of soil nutrient and chemical characteristics of *Robinia pseudoacacia* L. plantation forestland in Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(5): 91-95.
- [8] 吴平, 薛建辉. 典型喀斯特地区 3 种人工林对土壤理化和微生物特性的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2015, 39(5): 67-72.
Wu P, Xue J H. Effects of three different plantations on soil physicochemical and microbial characteristics in kast region[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2015, 39(5): 67-72.
- [9] 王春梅, 刘艳红, 邵彬, 等. 量化退耕还林后土壤碳变化[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(3): 112-119.
Wang C M, Liu Y H, Shao B, et al. Quantifying the soil carbon changes following the afforestation of former arable land[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(3): 112-119.
- [10] 王艳芳, 刘领, 李志超, 等. 豫西黄土丘陵区不同林龄栎类和侧柏人工林碳、氮储量[J]. 应用生态学报, 2018, 29(1): 25-32.
Wang Y F, Liu L, Li Z C, et al. Storage of carbon and nitrogen in *Quercus* and *Platyclusus orientalis* plantations at different ages in the hilly area of western Henan Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(1): 25-32.
- [11] 杨芳绒. 河南洛宁浅山区刺槐能源林生物量与热值研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
Yang F R. The study on biomass and caloric value of locust energy forests in Luoning Hilly Region, Henan[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013.
- [12] Zhang B, Horn R. Mechanisms of aggregate stabilization in Ultisols from subtropical China[J]. Geoderma, 2001, 99(1/2): 123-145.
- [13] 吕春娟, 路琼. 矿区复垦植被土壤涵养水源功能的研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 184-188.
Lü C J, Lu Q. Water-source conservation function of vegetation soil in reclamation mine[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(3): 184-188.
- [14] 赵娜, 孟平, 张劲松, 等. 华北低丘山地不同退耕年限刺槐人工林土壤质量评价[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2): 351-358.
Zhao N, Meng P, Zhang J S, et al. Soil quality assessment of *Robinia pseudoacacia* plantations with various ages in the Grain-for-Green Program in hilly area of North China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(2): 351-358.
- [15] 孙娇, 赵发珠, 韩新辉, 等. 不同林龄刺槐林土壤团聚体化学计量特征及其与土壤养分的关系[J]. 生态学报, 2016, 36(21): 6879-6888.
Sun J, Zhao F Z, Han X H, et al. Ecological stoichiometry of soil aggregates and relationship with soil nutrients of different-aged *Robinia pseudoacacia* forests[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(21): 6879-6888.
- [16] 何淑勤, 宫渊波, 郑子成, 等. 不同植被类型条件下土壤抗蚀性变化特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 17-22.
He S Q, Gong Y B, Zheng Z C, et al. Changes and influences of soil anti-erodibility under different vegetation types[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(5): 17-22.
- [17] 洛宁县人民政府. 洛宁县特色农业 [EB/OL]. (2017-07-25) [2020-03-04]. <http://www.luoning.gov.cn/2017/0725/199.html>.
Luoning County People's Government. Characteristic agriculture in Luoning County. [EB/OL]. (2017-07-25) [2020-03-04]. <http://www.luoning.gov.cn/2017/0725/199.html>.
- [18] 张晋爱, 张兴昌, 邱丽萍, 等. 黄土丘陵区不同年限柠条林地土壤质量变化[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(增刊1): 136-140.
Zhang J A, Zhang X C, Qiu L P, et al. Dynamics of soil quality in a loess hilly area grown with *Caragana korshinskii*[J]. Journal of Agro-environment Science, 2007, 26(Suppl.1): 136-140.
- [19] 许明祥, 刘国彬, 赵允格. 黄土丘陵区土地利用及环境因子对土壤质量指标变异性的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(2): 409-417.
Xu M X, Liu G B, Zhao Y G. Effects of land use and environmental factors on the variability of soil quality indicators in hilly Loess Plateau region of China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(2): 409-417.

- [20] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: analysis and limitations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(2): 362–369.
- [21] Brye K R, Slaton N A, Norman R J. Soil physical and biological properties as affected by land leveling in a clayey aquert[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(2): 631–642.
- [22] Yüksek T, Yüksek F. The effects of restoration on soil properties in degraded land in the semi-arid region of Turkey[J]. *Catena*, 2010, 84(1/2): 47–53.
- [23] 李桂林, 陈杰, 孙志英, 等. 基于土壤特征和土地利用变化的土壤质量评价最小数据集确定[J]. *生态学报*, 2007, 27(7): 2715–2724.
Li G L, Chen J, Sun Z Y, et al. Establishing a minimum dataset for Soil quality assessment based on soil properties and land use change[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7): 2715–2724.
- [24] 盛炜彤. 关于我国人工林长期生产力的保持[J]. *林业科学研究*, 2018, 31(1): 1–14.
Sheng W T. On the maintenance of long-term productivity of plantation in China[J]. *Forest Research*, 2018, 31(1): 1–14.
- [25] 韦景树, 李宗善, 冯晓珂, 等. 黄土高原人工刺槐林生长衰退的生态生理机制[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(7): 2433–2444.
Wei J S, Li Z S, Feng X Y, et al. Ecological and physiological mechanisms of growth decline of *Robinia pseudoacacia* plantations in the Loess Plateau of China: a review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(7): 2433–2444.
- [26] 许明祥, 刘国彬. 黄土丘陵区刺槐人工林土壤养分特征及演变[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(1): 40–46.
Xu M X, Liu G B. The characteristics and evolution of soil nutrient in artificial black locust (*Robinia pseudoacacia*) forest land in the hilly Loess Plateau[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(1): 40–46.
- [27] Zuber S M, Behnke G D, Nafziger E D, et al. Crop rotation and tillage effects on soil physical and chemical properties in Illinois[J]. *Agronomy Journal*, 2015, 107(3): 971–978.
- [28] 朱秋莲, 邢肖毅, 张宏, 等. 黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2013, 33(15): 4674–4682.
Zhu Q L, Xing X Y, Zhang H, et al. Soil ecological stoichiometry under different vegetation area on loess hilly gully region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(15): 4674–4682.
- [29] Tian H, Chen G, Zhang C, et al. Pattern and variation of C: N: P ratios in China's soils: a synthesis of observational data[J]. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1-3): 139–151.
- [30] Cleveland C C, Liptzin D. C: N: P stoichiometry in soil: is there a “Redfield ratio” for the microbial biomass?[J]. *Biochemistry*, 2007, 85(3): 235–252.
- [31] 焦梦妍, 从怀军, 姚静, 等. 自然恢复序列梯度上退耕地土壤容重变化及其蓄水性能效应[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(5): 128–133.
Jiao M Y, Cong H J, Yao J, et al. Soil bulk density changes and its water-storage capacity of abandoned farmland in natural restoration series gradient of loess hilly-gully region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(5): 128–133.
- [32] 李法虎. 土壤物理化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
Li F H. Physical chemistry of soil[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [33] Pirmoradian N, Sepaskhah A R, Hajabbasi M A. Application of fractal theory to quantify soil aggregate stability as influenced by tillage treatments[J]. *Biosystems Engineering*, 2005, 90(2): 227–234.
- [34] 庄正, 张芸, 张颖, 等. 不同发育阶段杉木人工林土壤团聚体分布特征及其稳定性研究[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(6): 183–188.
Zhuang Z, Zhang Y, Zhang Y, et al. Study on distribution characteristics and stability of soil aggregate in Chinese fir plantation at different developmental stages[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(6): 183–188.
- [35] 张参参, 吴小刚, 刘斌, 等. 江西九连山不同海拔梯度土壤有机碳的变异规律[J]. *北京林业大学学报*, 2019, 41(2): 19–28.
Zhang C C, Wu X G, Liu B, et al. Variations in soil organic carbon along an altitudinal gradient of Jiulian Mountain in Jiangxi Province of eastern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2019, 41(2): 19–28.
- [36] 傅伯杰, 陈利顶, 邱扬, 等. 黄土丘陵小流域土壤物理性质的空间变异[J]. *地理学报*, 2002, 57(5): 587–594.
Fu B J, Chen L D, Qiu Y, et al. Variability of the soil physical properties on the Loess Plateau[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(5): 587–594.

(责任编辑 范娟 崔艳红
责任编辑 马履一)