

# 宁南黄土区典型林地土壤抗冲性及相关物理性质

王月玲<sup>1</sup>, 许浩<sup>1</sup>, 马璠<sup>1</sup>, 万海霞<sup>1</sup>, 董立国<sup>1</sup>, 韩新生<sup>1</sup>, 蔡进军<sup>2</sup>

(1.宁夏农林科学院荒漠化治理研究所, 宁夏防沙治沙与水土保持重点实验室, 银川 750002;

2.宁夏农林科学院 农业资源与环境研究所, 银川 750002)

**摘 要:**研究宁南黄土区典型林分类型土壤水文物理性质及抗冲性能,旨在从土壤抗冲性角度为该区域退耕还林工程的生态功能评价和树种配置提供科学依据。采用野外取样与室内试验相结合的方法,得到了 4 种林型(山杏纯林、山桃纯林、山杏×沙棘混交林、山杏×柠条混交林)的水文物理指标和土壤抗冲系数。结果表明:4 种不同林型的土壤容重、总孔隙度、持水性能与抗冲系数存在显著差异。在 0—30 cm 土层,土壤容重随着土层深度的增加总体呈现递增的趋势,大小排序为山杏林×沙棘林>山杏林>山桃林>山杏×柠条林;土壤总孔隙度和毛管孔隙度随土层的加深而减小,其中山杏×柠条混交林的含量最高;最大持水量为山杏×沙棘林>山杏林>山桃林>山杏×柠条林,毛管持水量和田间持水量大小均为山杏×柠条林>山杏林>山桃林>山杏×沙棘林;4 种林型的土壤抗冲系数为山杏×柠条林>山杏×沙棘林>山杏林>山桃林。土壤容重与土壤总孔隙度、毛管持水量、田间持水量、抗冲系数均呈现极显著的负相关,土壤总孔隙度与土壤田间持水量、抗冲系数呈现极显著的正相关关系。其中以土壤总孔隙度与土壤田间持水量、抗冲系数的相关性最好。通过上述分析,总体表现出山杏×柠条混交林优于其他 3 种林型,能够有效改善土壤结构,提高土壤抗侵蚀性能。

**关键词:**宁南黄土区;人工林;土壤水文物理性质;土壤抗冲性能

**中图分类号:**S157.1

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2021)01-0037-07

## Soil Anti-scourability and Its Related Physical Properties on Typical Forestlands in Loess Hilly Region of Southern Ningxia

WANG Yueling<sup>1</sup>, XU Hao<sup>1</sup>, MAFan<sup>1</sup>, WAN Haixia<sup>1</sup>, DONG Ligu<sup>1</sup>, HAN Xinsheng<sup>1</sup>, CAI Jinjun<sup>2</sup>

(1.Institute of Desertification Control, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences,

Ningxia Key Laboratory of Desertification Control and Soil and Water Conservation, Yinchuan 750002, China;

2.Institute of Resources and Environment, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China)

**Abstract:**In this study, we analyzed the soil hydro-physical properties and soil anti-scourability in typical forest types in the loess hilly region of Southern Ningxia in order to provide scientific basis for the ecological function evaluation and tree species allocation of the project of returning farmland to forest in the region from the perspective of soil anti-scourability. Soil hydro-physical indices and scourability coefficient of 4 forest types (pure forest of *Prunus sibirica*, pure forest of *Prunus davidiana*, mixed forest of *Prunus sibirica* × *sea-buckthorn*, mixed forest of *Prunus sibirica* × *Caragana korshinskii*) were obtained by the method of field sampling and laboratory test. The results showed that there were significant differences in soil bulk density, total porosity, water retention capacity and anti-scourability coefficient of 4 different forest types. In 0—30 cm soil layer, the soil bulk density showed an increasing trend with the increase of soil depth, and soil bulk density decreased in the order: *Prunus sibirica* × *Hippophae rhamnoides* forest > *Prunus sibirica* forest > *Prunus davidiana* forest > *Prunus sibirica* × *Caragana korshinskii* forest. The total porosity and capillary porosity of soil decreased with the depth of soil layer. The maximum water holding capacity decreased in the order: *Prunus sibirica* × *Hippophae rhamnoides* forest > *Prunus sibirica* forest > *Prunus davidiana* forest > *Prunus sibirica* × *Caragana korshinskii* forest. Both the gross water holding capacity and field water holding

收稿日期:2020-02-07

修回日期:2020-04-07

**资助项目:**国家重点研发计划课题“黄土梁状丘陵区林草植被体系结构优化及杏产业关键技术与示范”(2016YFC0501702);宁夏回族自治区全产业链创新示范项目“宁夏多功能林业分区域研究与示范”(YES-12-16);宁夏重点研发计划项目“宁夏黄土丘陵区小流域生态综合治理与高质量发展技术集成与示范”(2020BCF01001);宁夏自然科学基金资助项目“宁南黄土区典型人工林生态系统群落多样性及土壤微生态效应”(2019AAC03289)

**第一作者:**王月玲(1980—),女,宁夏固原人,硕士,副研究员,主要从事黄土高原水土保持与生态环境建设研究。E-mail:wylxnky@163.com

capacity decreased in the order: *Prunus sibirica* × *Caragana korshinskii* forest > *Prunus davidiana* forest > *Prunus sibirica* × *Hippophae rhamnoides* forest. The soil anti-scourability coefficients of 4 forest types decreased in the order: *Prunus sibirica* × *Caragana korshinskii* forest > mountain apricot × *Hippophae rhamnoides* forest > *Prunus sibirica* forest > *Prunus davidiana* forest. Soil bulk density was negatively correlated with soil total porosity, capillary water holding capacity, field water holding capacity and soil anti-scourability coefficient, while soil total porosity was positively correlated with soil water holding capacity and impact resistance coefficient. The correlation between soil total porosity and soil water holding capacity and soil resistance coefficient was the best. Based on the above analysis, it is concluded that *Prunus sibirica* × *Caragana korshinskii* mixed forest is superior to the other three forest types, which can effectively improve the soil structure and the soil erosion resistance ability.

**Keywords:** loess hilly region of Southern Ningxia; artificial forest; soil hydro-physical properties; soil anti-scourability

黄土区地形破碎,土壤抗蚀性差,植被覆盖率低,是中国水土流失严重的地区之一,也是国家退耕还林生态修复的重点区域之一。近年来国家通过大面积的退耕还林还草、自然撂荒等生态修复工程,使该区域的生态环境得到了明显的改善<sup>[1-4]</sup>。

土壤抗冲性是指土壤抵抗外力机械破坏作用的能力,是土壤抗侵蚀性能的重要方面<sup>[5]</sup>。造成黄土区土壤侵蚀剧烈的主要原因就是土壤抗冲性弱,从而使土壤冲刷过程强烈。抗冲性受土壤理化性质、土地利用类型、地形和气候等多种因素影响。目前,我国学者已从多角度对黄土高原土壤抗冲性进行了大量的研究,李勇等<sup>[6]</sup>对植物根系与土壤抗冲性关系进行了研究,得出植物根系增强了土壤的抗冲力,提高了土壤抗冲性;张艺等<sup>[7]</sup>对典型流域不同土地利用类型的土壤抗冲性进行了研究,得出土壤抗冲性大小依次为:刺槐林 > 草地 > 梯田 > 果园 > 坡耕地;查小春等<sup>[8]</sup>对开垦地土壤抗冲性的时间变化进行了研究,得出林地具有很强的抗冲性能,一旦被开垦后,随侵蚀年限的增长,土壤的抗冲性呈现减弱趋势;张建军等<sup>[9]</sup>研究了流量、糙率对不同植被条件土壤抗冲性的影响,得出土壤抗冲性随流量的增大而减弱,糙率与土壤抗冲性呈现正相关;周佩华等<sup>[10]</sup>研究了土壤抗冲性的试验方法和评价指标;王丹丹等<sup>[11]</sup>研究了坡度、枯落物、生物多样性对刺槐 × 侧柏混交退耕林地的土壤抗冲性,得出退耕林地的土壤抗冲性与坡度、枯落物及生物多样性呈现显著相关。但是,关于宁南黄土区典型林分土壤的抗冲性以及植被、土壤和气候等影响因素的关系方面涉及不多,特别是林地土壤抗冲性与土壤水文物理关系的研究未见报道。宁南黄土区退耕还林近 20 a 来,生态环境得到了明显的改善。在林地恢复过程中,以山杏、山桃、沙棘、山杏柠条混交为主要组成树种的人工林水文特性及抗侵蚀能力怎样?成为目前亟待解决的科学问题。为此,本

研究以宁南黄土区 4 种典型林分山杏林、山桃林、山杏 × 柠条混交林、山杏 × 沙棘混交林为研究对象,比较不同林分改善土壤水文物理性质以及土壤抗冲性强弱,并分析土壤抗冲性及相关物理性质的相关性,以为该区域退耕还林工程建设的生态功能评价及树种配置提供科学的理论依据和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于彭阳县东北 13 km 处的白阳镇中庄村,坐标为 106°41′—106°45′E, 35°51′—35°55′N,地貌类型属于黄土高原腹部梁峁丘陵地,平均海拔为 1 600~1 700 m,年平均气温 7.6℃,年平均降水量 420~500 mm,降水量集中且年内分配不均,主要集中在 7、8、9 月,而且降水的年际变差系数较大,雨量集中月份常以暴雨形式出现,易发局地暴雨洪水。≥10℃的积温为 2 200~2 750℃,境内年蒸发量较大,干燥度(≥0℃的蒸发量)为 1.21~1.99,无霜期 140~160 d。研究区土壤类型以普通黑垆土为典型土壤,土壤母质为黄土及黄土状物,pH 值在 8.0~8.5,土层深厚,土质疏松。植被类型以草原植被为基础,生长有长芒草(*Stipa bungeana* Trin.)、百里香(*Thymus quinquecostatus* Celak.)、西山委陵菜(*Potentilla sischanensis* Bge.ex Lehm.)、二裂委陵菜(*Potentilla bifurca* L.)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus* Novopokr.)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica* Laxm. Schindl.)等草本植物。其次还有中生和旱中生的落叶阔叶灌丛、落叶阔叶林、草甸。人工植被以山杏(*Prunus sibirica* L.)、山桃(*Prunus davidiana* Franch.)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)、柠条(*Caragana korshinskii* Kom.)等为主。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样地的选择 本研究试验地选择宁南黄土区人工林立地条件基本一致的 17 a 生的山杏纯林、山

桃纯林、山杏×沙棘混交林、山杏×柠条混交林 4 种 典型林型为研究对象,样地的基本情况见表 1。

表 1 样地基本概况

林分类型	经度 E	纬度 N	海拔/m	坡度/(°)	坡向	坡位	林龄/a
山杏林	106.748434°	35.950237°	1722	23	半阳坡	中部	17
山桃林	106.723028°	35.954298°	1725	23	半阳坡	中部	17
山杏×柠条混交林	106.724173°	35.941402°	1707	26	半阴坡	上部	17
山杏×沙棘混交林	106.722962°	35.938831°	1718	21	半阳坡	上部	17

1.2.2 土壤样品的采集 于 2019 年 5 月在各人工林地样地内随机挖取 2 个深 30 cm 的剖面,按从上到下斜对角线方式用 100 cm<sup>3</sup>,200 cm<sup>3</sup> 的环刀分别采取 0—10 cm,10—20 cm,20—30 cm 的原状土样,每层取 3 个重复,共 6 个重复,带回实验室进行待测。

1.2.3 土壤容重、总孔隙度和持水量等指标的测定 土壤容重、总孔隙度、土壤持水量等指标采用 100 cm<sup>3</sup> 环刀—浸泡法<sup>[12]</sup> 进行测定。

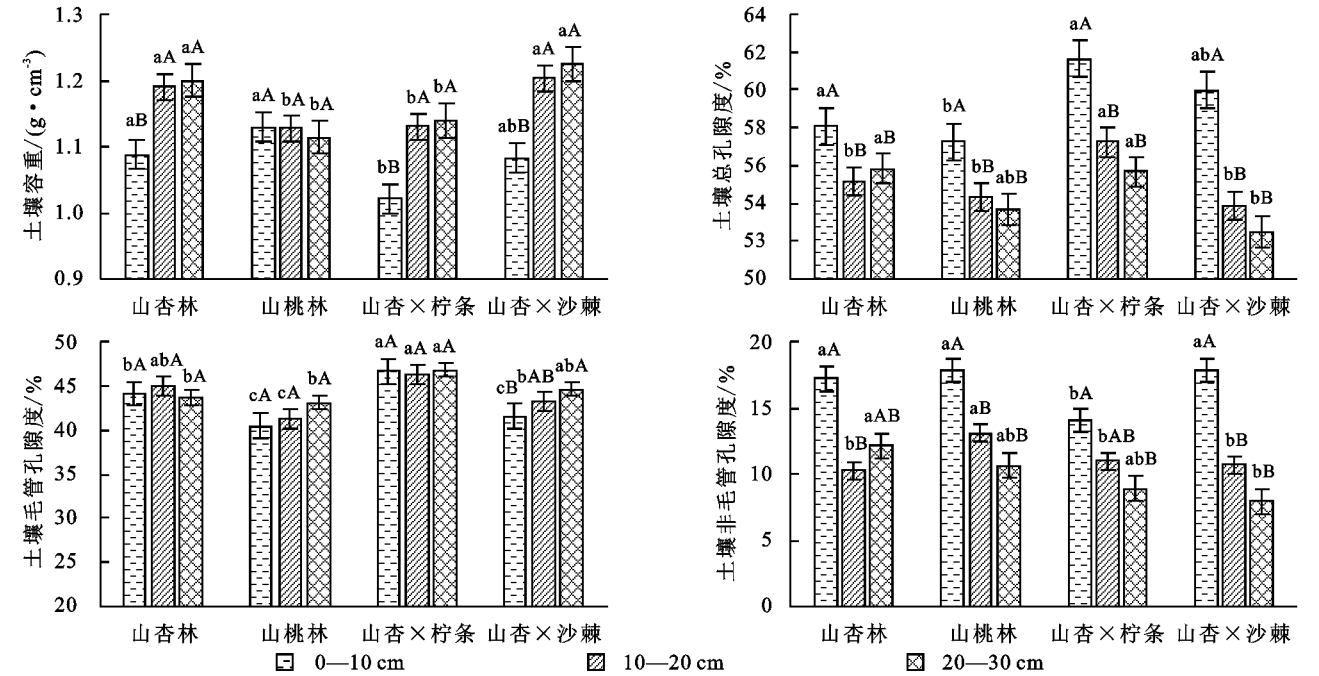
1.2.4 土壤抗冲性测定 土壤抗冲性采用原状土冲刷法进行测定,以蒋定生采用的水槽冲刷法为基础,使用 200 cm<sup>3</sup> 的环刀进行取样。200 cm<sup>3</sup> 的环刀原状土取回后,先自然风干。在试验前一天,先将样品浸泡 6 h,然后取出静置 24 h 开始冲刷试验。本试验冲刷槽坡度为 20°,槽宽度为 8 cm,设计单宽流量 4 000 L/(h·m),单次耗水量仅为 16 L<sup>[13]</sup>,冲刷时间 3 min。泥沙取样用一个 20 L 容积的大塑料通接收。

1.2.5 数据处理方法 采用 Excel 2016 进行数据处理,用 DPS 16.05 和 SPSS 19.0 统计分析软件进行单因素方差分析和相关分析,不同参数多重比较采用 LSD 法。

2 结果与分析

2.1 不同人工林地土壤容重、孔隙度的差异

土壤容重和孔隙度代表土壤的松紧程度及孔隙状况,是土壤物理性质的重要指标。由图 1 可以看出:在 0—30 cm 土层,不同林地土壤容重在 1.02~1.23 g/cm<sup>3</sup> 变化,不同林地同一土层间土壤容重差异显著( $p < 0.05$ )。表土层 0—10 cm 土壤容重的排序为:山桃林(1.13 g/cm<sup>3</sup>)>山杏林(1.09 g/cm<sup>3</sup>)>山杏×沙棘林(1.08 g/cm<sup>3</sup>)>山杏×柠条林(1.02 g/cm<sup>3</sup>),下层 10—30 cm 土壤容重的排序为:山杏×沙棘林(1.21 g/cm<sup>3</sup>)>山杏林(1.20 g/cm<sup>3</sup>)>山杏×柠条林(1.14 g/cm<sup>3</sup>)>山桃林(1.12 g/cm<sup>3</sup>),可以看出混交林对表层土壤容重的改善明显优于纯林,尤其是山杏柠条混交林,下层 10—30 cm 的土壤容重也明显低于山杏纯林。在垂直剖面上,各林地表层 0—10 cm 土壤容重明显小于 10—30 cm 土层,10—20 cm 和 20—30 cm 土层土壤容重同一林地差异均不显著( $p < 0.01$ )。0—30 cm 土层除了山桃林外,土壤容重随着土层深度的增加总体呈现递增的趋势。



注:图中小写字母表明不同林地同一土层差异显著性( $p < 0.05$ ),大写字母表明同一林地不同土层差异显著性( $p < 0.01$ ),图中使用的误差为标准差,下同。

图 1 不同林地土壤容重和孔隙度的变化



在 0—30 cm 土层,不同林地土壤总孔隙度在 52.51%~61.63% 变化,土壤毛管孔隙度在 40.39%~46.69% 变化,土壤非毛管孔隙度在 7.91%~17.80% 变化。不同林地同一土层间土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度存在显著差异 ( $p < 0.05$ )。表土层 0—10 cm 土壤总孔隙的排序为:山杏×柠条林(61.63%)>山杏×沙棘林(59.99%)>山杏林(58.06%)>山桃林(57.26%),下层 10—30 cm 土壤总孔隙度的排序为:山杏×柠条林(56.46%)>山杏林(55.50%)>山桃林(54%)>山杏×沙棘林(53.18%),与土壤容重的变化顺序基本相反。在垂直剖面上,表土层 0—10 cm 的土壤总孔隙度明显高于下层 10—30 cm,整个土层 0—30 cm 土壤总孔隙度基本上是随着土层深度的加深呈现递减的趋势。10—20 cm 和 20—30 cm 土层土壤总孔隙度的变化差异各林地均不显著 ( $p < 0.01$ )。土壤毛管孔隙度 0—30 cm 土层排序基本为:山杏×柠条林(46.59%)>山杏林(44.23%)>山杏×沙棘林(43.11%)>山桃林(41.56%),土壤非毛管孔隙度排序基本为:山桃林(13.84%)>山杏林(13.20%)>山杏×沙棘林(12.13%)>山杏×柠条林(11.31%)。

总体可以看出,不同林地表层 0—10 cm 土壤结构松散,土壤容重较小,土壤总孔隙度和毛管孔隙度较大,说明混交林对表层土壤改善的优势明显,尤其是山杏柠条混交林地,土壤结构得到较大程度的改善。但是下层 10—20 cm 和 20—30 cm 土层变化差异不是很显著。

## 2.2 不同人工林地土壤持水性能差异

土壤水分是土壤中营养循环流动与物质转化的载体,对不同林分类型土壤蓄水能力的研究有助于了解不同林分类型的森林土壤保水性能<sup>[14]</sup>。由图 2 可以看出,不同林地土壤饱和持水量在 42%~61.87% 变化,0—30 cm 土层土壤饱和持水量存在显著差异 ( $p < 0.05$ )。不同林地 0—10 cm 土壤饱和持水量的排序为:山杏×沙棘林>山杏林>山杏×柠条林>山桃林。在垂直剖面上,表土层 0—10 cm 土壤饱和持水量均显著高于 10—30 cm 土层,整个土层 0—30 cm 土壤饱和持水量基本上是随着土层深度的加深,土壤饱和持水量呈现减少的趋势,且差异极显著 ( $p < 0.01$ )。10—20 cm 和 20—30 cm 土层土壤饱和持水量的变化差异各林地均不显著 ( $p > 0.05$ )。

不同林地土壤毛管持水量在 35.92%~45.77% 变化。不同林地 0—30 cm 土层土壤毛管持水量存在显著差异 ( $p < 0.05$ )。不同林地 0—10 cm 土壤毛管持水量的排序为:山杏×柠条林>山杏林>山杏×沙棘林>山桃林。在垂直剖面上,表土层 0—10 cm 土壤毛管持水量基本上显著高于 10—30 cm 土层,整个

土层 0—30 cm 土壤毛管持水量基本上是随着土层深度的加深呈现减少的趋势,且差异极显著 ( $p < 0.01$ )。10—20 cm 和 20—30 cm 土层土壤毛管持水量的变化差异各林地变化均不显著 ( $p > 0.05$ )。

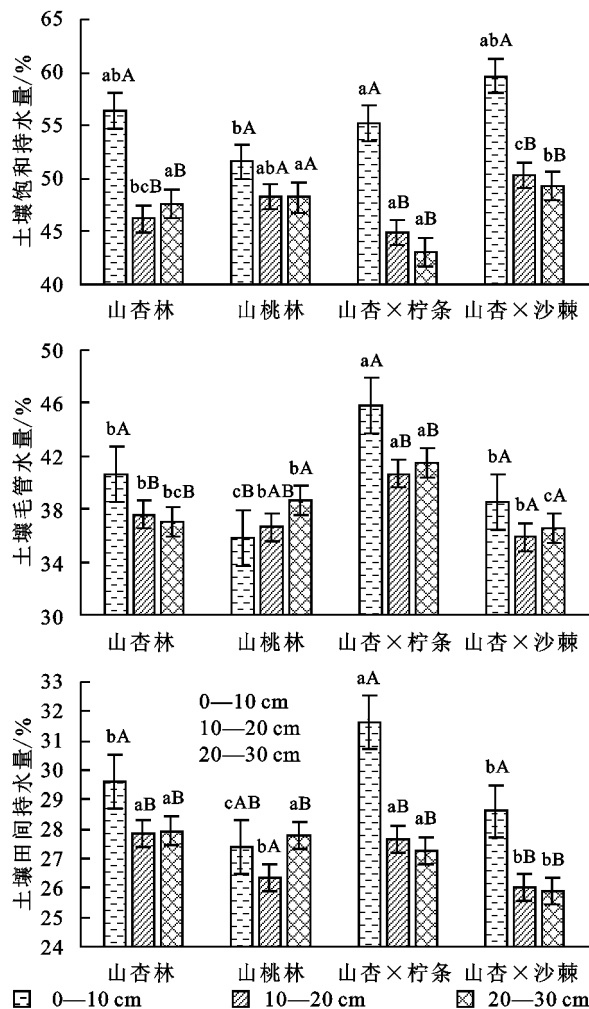


图 2 不同林地土壤持水量变化

不同林地土壤田间持水量在 25.92%~31.63% 变化。不同林地 0—30 cm 土层土壤田间持水量存在显著差异 ( $p < 0.05$ )。不同林地 0—10 cm 土壤田间持水量的排序为:山杏×柠条林>山杏林>山杏×沙棘林>山桃林。在垂直剖面上,表土层 0—10 cm 土壤田间持水量均显著高于 10—30 cm 土层,10—20 cm 和 20—30 cm 土层土壤田间持水量的变化差异除了山桃林差异极显著 ( $p < 0.01$ ) 外,其他林地变化均不显著 ( $p > 0.05$ )。

总体可以看出,在 0—30 cm 土层,不同林分在土壤垂直剖面分层上持水能力大部分存在显著差异 ( $p < 0.01$ )。土壤饱和持水量、土壤毛管持水量和土壤田间持水量的最大值基本都出现在 0—10 cm 表层土壤,下层 10—30 cm 土层各林地持水量的变化不显著。另外,在 0—10 cm 土层,山杏×柠条混交林的土壤饱和持水量、毛管持水量与田间持水量都与其他

3 种林分类型差异显著 ( $p < 0.05$ ), 土壤毛管持水量和田间持水量的大小排序均为山杏  $\times$  柠条林  $>$  山杏林  $>$  山杏  $\times$  沙棘林  $>$  山桃林。

2.3 不同人工林地土壤抗冲性能

土壤抗冲性是表征土壤抵抗外营力机械破坏能力的指标之一, 反映特定状态下土壤在水蚀环境中的流失情况。由于土壤的冲刷主要集中在表层土壤, 本研究对土壤抗冲性的分析主要为表层土壤 (0—30 cm)。由图 3 可以看出, 在表土层 0—10 cm, 从不同人工林土壤泥沙冲刷量变化可以看出, 泥沙量最大的是山桃林, 达到 13.38 g, 其次是山杏林, 山杏沙棘林, 分别为 3.23 g, 2.04 g, 山杏柠条林最低为, 为 1.2 g, 说明混交林在 0—10 cm 的土层中冲刷量要明显低于纯林。另外从图 3 中, 也可以看出在 0—10 cm 土层, 抗冲系数和抗冲耗能的变化规律刚好与泥沙量相反, 混交林的抗冲系数和抗冲耗能明显的要高于纯林。说明泥沙冲刷量越小, 土壤抗冲性能越高。在 0—10 cm 土层, 抗冲系数最大的是山杏柠条混交林, 达到 52.34 (L  $\cdot$  min)/g, 其次是山杏沙棘林、山杏林、山桃林, 分别为 40.93 (L  $\cdot$  min)/g, 31.49 (L  $\cdot$  min)/g, 9.73 (L  $\cdot$  min)/g; 在 0—10 cm 土层, 抗冲耗能最大的也是山杏柠条混交林, 达到 16.13 J/g, 其次是山杏沙棘林、山杏林、山桃林, 分别为 10.30 J/g, 5.31 J/g, 1.09 J/g。另外, 从表 2 不同人工林的变异数可以看出, 表土层 0—10 cm 的土壤泥沙量、土壤抗冲系数和抗冲耗能的变异系数变异性极大, 泥沙量变异数最高为 1.22, 最低为 0.54; 抗冲系数的变异性最高达到 1.55, 最低为 0.70; 抗冲耗能变异系数最高达到 1.57, 最低为 0.66。从统计学上, 这时的平均值所具有的代表性意义不是很大。方差分析也表明, 不同林地 在 0—10 cm 土层不在显著差异 ( $p < 0.05$ )。

在 10—20 cm 和 20—30 cm 土层, 不同人工林地的土壤泥沙量、土壤抗冲系数和土壤抗冲耗能的变化规律基本是一致的。在垂直剖面, 土壤泥沙量随着土层深度的增加总体呈现出递增趋势 (除山桃林外), 抗冲系数和抗冲耗能随着土层深度的增加总体呈现递减趋势。

2.4 不同林分类型土壤水文物理指标及抗冲性的相关性分析

本文采用 Person 相关系数描述各指标间的相关分析, 由表 3 可以看出, 土壤容重与土壤总孔隙度、毛管持水量、田间持水量、抗冲系数均呈现极显著的负相关, 其中以土壤容重与土壤总孔隙度的相关性最好, 相关系数为  $-0.813$ ; 土壤总孔隙度与土壤田间持水量、抗冲系数呈现极显著的正相关关系, 与最大持

水量、毛管持水量、非毛管孔隙度呈现显著的正相关关系, 毛管孔隙度与毛管持水量呈现极显著的正相关关系, 非毛管孔隙度与最大持水量呈现极显著的正相关关系, 毛管持水量、田间持水量均与抗冲系数呈现极显著正相关关系, 与其他学者研究结果一致<sup>[15]</sup>。反映出土壤总孔隙度与非毛管孔隙度越大, 土壤的最大持水量越高, 则土壤的持水性能越好, 土壤的抗冲性能就越强。

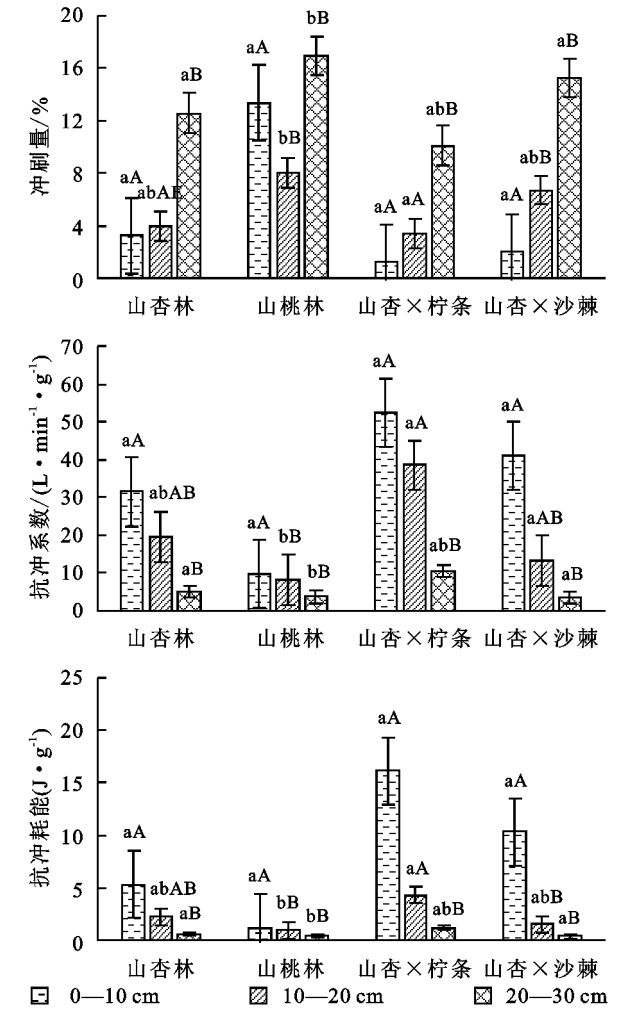


图 3 不同人工林地 0—30 cm 土层土壤抗冲指标变化  
表 2 不同人工林地 0—30 cm 土层土壤泥沙量、抗冲系数和抗冲耗能变异系数

抗冲指标	土层/cm	山杏林	山桃林	山杏×柠条林	山杏×沙棘林
泥沙量	0—10	1.22	0.54	0.94	1.15
	10—20	0.43	0.55	1.27	0.97
	20—30	0.45	0.38	0.82	0.35
抗冲系数	0—10	0.71	1.55	0.70	0.85
	10—20	0.61	0.71	0.90	0.82
	20—30	0.80	0.80	0.98	0.31
抗冲耗能	0—10	0.66	1.55	1.57	1.05
	10—20	0.61	0.71	0.90	0.82
	20—30	0.80	0.80	0.98	0.31

表 3 土壤抗冲性及水文物理性质的相关性

指标	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$
$X_1$	1							
$X_2$	-0.063	1						
$X_3$	-0.610*	-0.548	1					
$X_4$	-0.813**	0.147	0.692*	1				
$X_5$	-0.556	-0.368	0.782**	0.626*	1			
$X_6$	-0.738**	0.711**	0.070	0.681*	0.167	1		
$X_7$	-0.802**	0.340	0.493	0.862**	0.535	0.809**	1	
$X_8$	-0.723**	0.350	0.451	0.875**	0.547	0.727**	0.770**	1

注：\* 表示  $p<0.05$ ；\*\* 表示  $p<0.01$ ； $X_1$  表示土壤容重； $X_2$  表示土壤毛管孔隙度； $X_3$  表示土壤非毛管孔隙； $X_4$  表示土壤总孔隙度； $X_5$  表示最大持水量； $X_6$  表示毛管持水量； $X_7$  表示土壤田间含水量； $X_8$  表示土壤抗冲系数。

3 讨论与结论

由于所使用的造林树种不同,4 种退耕还林模式的恢复效果也不相同。本研究发现:不同人工林地表层 0—10 cm 土壤结构松散,土壤容重较小,土壤总孔隙度较大,且差异均极显著( $p<0.01$ )。10—20 cm 和 20—30 cm 土层土壤容重和土壤总孔隙度同一林地差异均不显著( $p<0.05$ )。0—30 cm 土层不同林地土壤容重随着土层深度的增加总体呈现递增的趋势,土壤总孔隙度的变化趋势刚好与之相反,与张晓梅<sup>[16]</sup>、顾宇书<sup>[17]</sup>等对森林土壤物理性质随土层变化的研究结论相一致。4 种林分土壤总孔隙度变化范围为 52.51%~61.63%,这与鲁绍伟等<sup>[18]</sup>对中国大部分森林生态系统土壤总孔隙度范围为 40%~60%的研究结果基本相吻合。0—10 cm 土层内以混交林土壤容重最小,土壤总孔隙最大,总体反映出混交林对表层土壤改善的优势明显,尤其是山杏柠条混交林地,土壤结构得到较大程度的改善,但是下层 10—20 cm 和 20—30 cm 土层变化差异不是很显著。

土壤容重和孔隙度是影响土壤蓄水能力的关键因素,本研究表明不同林分在 0—30 cm 土层,垂直剖面分层上土壤持水能力大部分存在显著差异( $p<0.01$ )。土壤饱和持水量、土壤毛管持水量和土壤田间持水量的最大值基本都出现在 0—10 cm 表层土壤,下层 10—30 cm 土层各林地持水量的变化不显著。另外,在 0—10 cm 土层,山杏×柠条混交林的土壤饱和持水量、毛管持水量与田间持水量都与其他 3 种林分类型差异显著( $p<0.05$ ),土壤毛管持水量和田间持水量的大小排序均为山杏×柠条林>山杏林>山杏×沙棘林>山桃林。总体表明山杏柠条混交林的持水性明显高于纯林,有较好的水源涵养能力。这与韦洁<sup>[19]</sup>、李民义<sup>[15]</sup>对人工纯林和混交林对土壤水文物理性质的变化研究相一致。总体上反映出混交林在改良土壤物理性质、涵养水源功能方面发挥的

作用要优于纯林。4 种典型林地的室内土壤抗冲性试验表明:在表土层 0—10 cm,泥沙量最大的是山桃林,其次是山杏林,山杏沙棘林,山杏柠条林最低为,说明混交林在 0—10 cm 的土层中冲刷量要明显低于纯林。抗冲系数和抗冲耗能的变化规律刚好与泥沙量相反,说明混交林的抗冲系数和抗冲耗能明显的要高于纯林,与苏成西<sup>[20]</sup>对不同退耕还林模式中混交林较纯林改良土壤效果要好,土壤抗冲性能强的研究结论相一致。总体反映出不同人工林地表土层 0—10 cm 泥沙冲刷量越小,土壤抗冲性能越高。在 10—20 cm 和 20—30 cm 土层,不同人工林地的土壤泥沙量、土壤抗冲系数和土壤抗冲耗能的变化规律基本是一致的。

土壤水文物理指标受成土过程影响的同时也影响林地的持水性能,各物理指标在一定程度上存在关联<sup>[21]</sup>。经相关性分析表明,4 种典型林地土壤抗冲性与土壤物理性质关系密切。土壤容重、土壤总孔隙度、土壤毛管持水量和田间持水量均是影响土壤抗冲性的关键指标,与李超等<sup>[22]</sup>的研究结论相一致。土壤抗冲性与土壤容重呈现极显著的负相关关系,与土壤总孔隙度、毛管持水量和田间持水量呈现显著的正相关关系。总体反映出土壤总孔隙度与非毛管孔隙度越大,土壤的最大持水量越高,则土壤的持水性能越好,土壤的抗冲性能就越强。因此,结合本研究中土壤水文物理性质和抗冲性能的综合分析结果,建议在该区域的生态建设及水土保持林结构调整中,应选择合适的造林树种和树种配置,提倡混交造林,为更好地评价黄土丘陵区退耕还林工程的生态功能提供科学的理论依据。

参考文献:

[1] 傅伯杰.强化黄土高原土地利用水土保持效应[N].中国国土资源报,2016-09-22(6).  
[2] 周正朝,上官周平.子午岭次生林植被演替过程的土壤抗冲性[J].生态学报,2006,26(10):3270-3275.  
[3] 吴建平,韩新辉,任成杰,等.黄土丘陵区不同恢复年限



退耕林地土壤碳氮差异及其影响因素[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2017, 45(6): 123-133.

[4] 赵允格, 许明祥, 王全九, 等. 黄土丘陵区退耕地生物结皮对土壤理化性状的影响[J]. 自然资源学报, 2006, 21(3): 441-448.

[5] 李强, 刘国彬, 许明祥, 等. 黄土丘陵区撂荒地土壤抗冲性及相关理化性质[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 153-159.

[6] 李勇, 徐晓琴, 朱显谟, 等. 植物根系与土壤抗冲性[J]. 水土保持学报, 1993, 7(3): 11-18.

[7] 张艺, 李海光, 余新晓, 等. 黄土高原典型流域土壤抗冲特性研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(2): 60-63.

[8] 查小春, 唐克丽. 黄土丘陵区开垦地土壤抗冲性的时间变化研究[J]. 水土保持通报, 2001, 21(2): 8-11.

[9] 张建军, 张宝颖, 毕华兴, 等. 黄土区不同植被条件下的土壤抗冲性[J]. 北京林业大学学报, 2004, 26(6): 25-29.

[10] 周佩华, 郑世清, 吴普特, 等. 黄土高原土壤抗冲性的试验研究[J]. 水土保持研究, 1997, 4(5): 47-58, 66.

[11] 王丹丹, 张建军, 丁杨, 等. 晋西黄土区退耕林地土壤抗冲性研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 14-18.

[12] 陈国靖. 宁南黄土丘陵区土壤理化性质对不同植被恢复模式的响应[D]. 银川: 宁夏大学, 2018.

[13] 马璠. 黄土丘陵区土壤抗冲性研究思考[M]. 银川: 宁夏人民教育出版社, 2019.

[14] 梁博, 聂晓刚, 杨东升, 等. 西藏尼洋河流域下游 5 种典型土地利用方式土壤物理性质差异分析[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2018, 46(1): 119-128.

[15] 李民义. 晋西黄土区不同植被类型植物多样性及土壤水文物理特征研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.

[16] 张晓梅, 邸利, 王彦辉, 等. 黄土高原典型林分土壤水文物理性质及持水性能[J]. 甘肃农业大学学报, 2019, 54(3): 117-124, 133.

[17] 顾宇书, 邢兆凯, 韩友志, 等. 浑河上游 4 种典型水源林土壤物理性质及其水源涵养功能[J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(1): 37-41.

[18] 鲁绍伟, 毛富玲, 靳芳, 等. 中国森林生态系统水源涵养功能[J]. 水土保持研究, 2005, 12(4): 223-226.

[19] 韦洁. 广西大青山人工纯林和混交林对植物多样性和土壤肥力的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2011.

[20] 苏成西, 尚宇南. 不同退耕还林模式的土壤抗冲性研究[J]. 河南农业科学, 2014, 43(8): 57-63.

[21] 邹文秀, 韩晓增, 陆欣春, 等. 不同土地利用方式对黑土剖面土壤物理性质的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 187-193, 199.

[22] 李超, 周正朝, 朱冰冰, 等. 黄土丘陵区不同撂荒年限土壤入渗及抗冲性研究[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 61-66.

~~~~~

(上接第 36 页)

[13] Hancock G R, Murphy D, Evans K G. Hillslope and catchment scale soil organic carbon concentration: An assessment of the role of geomorphology and soil erosion in an undisturbed environment [J]. Geoderma, 2010, 155(1/2): 36-45.

[14] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 黑土坡耕地侵蚀和沉积对物理性组分有机碳积累与损耗的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(3): 467-474.

[15] 贾松伟, 贺秀斌, 陈云明, 等. 黄土丘陵区土壤侵蚀对土壤有机碳流失的影响研究[J]. 水土保持研究, 2004, 11(4): 88-90.

[16] 周一鹏, 张雨辰, 罗鑫叶, 等. 土壤有机质空间变异性及其驱动因素研究进展[J]. 土壤通报, 2019, 50(6): 1492-1499.

[17] 李龙, 姚云峰, 秦富仓, 等. 赤峰市黄花甸子流域土壤有机碳含量的空间变异特征研究[J]. 环境科学学报, 2014, 34(3): 742-748.

[18] 李龙, 姜丽娜, 白建华. 半干旱区土壤有机碳空间变异及其影响因素的多尺度相关分析[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(5): 40-48.

[19] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明. 黄土丘陵区小流域土地利用变化对生态环境的影响: 以延安市羊圈沟流域为例[J]. 地理学报, 1999, 54(3): 51-56.

[20] 王德全, 关印山, 李显瑞. 坝上草原生态系统建设的演变、教训与措施[J]. 中国草地, 1992(2): 78-80.

[21] 邹心雨, 张卓栋, 吴梦瑶, 等. 河北坝上地区坡面尺度土壤机械组成的空间变异[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(5): 44-53.

[22] 张科利, 王志强, 高晓飞, 等. 土壤地理综合实践教程[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 211-214.

[23] 刘伟, 程积民, 陈芙蓉, 等. 黄土高原中部草地土壤有机碳密度特征及碳储量[J]. 草地学报, 2011, 19(3): 425-431.

[24] 何燕, 李廷轩, 王永东. 低山丘陵区不同坡位茶园土壤有机碳特征研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(2): 122-126.

[25] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(1): 99-105.

[26] Kätterer T, Bolinder M A, Andrén O, et al. Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues, as revealed by a long-term field experiment[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, 141(1/2): 184-192.

[27] 王雪妍, 张卓栋, 罗梦婷, 等. 河北坝上地区坡面尺度根系生物量空间变异[J]. 水土保持研究, 2015, 22(6): 72-77.