

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20150372

# 秦岭火地塘林区3种土地利用类型的土壤潜在水源涵养功能评价

刘宇<sup>1</sup> 郭建斌<sup>1</sup> 邓秀秀<sup>2</sup> 刘泽彬<sup>3</sup>

(1 北京林业大学水土保持学院 2 中南林业科技大学林学院 3 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所)

**摘要:**为了研究秦岭火地塘林区松栎混交林土壤的潜在水源涵养功能,以荒草地和农用地2种土地利用类型作为对照,于2011年5月在3种土地利用类型的样地上挖掘土壤剖面,并对其土壤物理性质和蓄水、入渗能力进行了分析,最后运用坐标综合评定法首次对该地区3种土地利用类型的土壤潜在水源涵养能力进行定量评价。结果表明:3种土地利用类型的土壤密度由大到小为荒草地(1.25 g/cm<sup>3</sup>) > 农用地(1.22 g/cm<sup>3</sup>) > 松栎混交林地(0.82 g/cm<sup>3</sup>),土壤总孔隙度由大到小为松栎混交林地(87.40%) > 荒草地(45.87%) > 农用地(38.95%);松栎混交林地土壤的蓄水性能和渗透性能最好,农用地最差。运用坐标综合评定法对3种土地利用类型进行评价,结果表明:松栎混交林地土壤的潜在水源涵养功能最佳(0.00),农用地土壤的潜在水源涵养功能最差(1.10),建议在该地区继续实施退耕还林以提高土壤的水源涵养能力。本研究为认识和综合评价火地塘林区松栎混交林的生态服务功能积累了基础资料,从而为南水北调中线工程的水源保障措施提供了一定的理论基础。

**关键词:**秦岭;混交林;森林土壤;水源涵养

中图分类号:S714.7 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2016)03-0073-08

LIU Yu<sup>1</sup>; GUO Jian-bin<sup>1</sup>; DENG Xiu-xiu<sup>2</sup>; LIU Ze-bin<sup>3</sup>. **Evaluation of potential water conservation function of the soil of three land use types in Huoditang of Qinling Mountains, northwestern China.** *Journal of Beijing Forestry University* (2016)38(3) 73-80 [Ch,25 ref.]

1 School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, P. R. China;

2 College of Forestry, Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan, 410004, P. R. China;

3 Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing, 100091, P. R. China.

In order to study the potential water conservation function of the soil of pine-oak mixed forest, the profiles were dug on the plots of three land use types in May of 2011, with the grassland and farmland as contrast. Then the soil physical properties, water-holding capacity and infiltration capacity were analyzed, and the potential water conservation capacity of soil was quantitatively evaluated by the method of comprehensive coordinate. Results showed that the order of soil bulk density from high to low was grassland (1.25 g/cm<sup>3</sup>) > farmland (1.22 g/cm<sup>3</sup>) > pine-oak mixed forest land (0.82 g/cm<sup>3</sup>). The rank of soil total porosity from high to low was pine-oak mixed forest land (87.40%) > grassland (45.87%) > farmland (38.95%). The pine-oak mixed forest land had the best water-holding capacity and infiltration capacity, and the farmland had the worst. The result using the method of comprehensive coordinate showed that the potential water conservation function of the soil of pine-oak mixed forest land was the best while the farmland was the worst, suggesting that the Reversion of Farmland to Forest Program should be kept on so as to raise the soil water conservation capacity in this region. This study

收稿日期:2015-10-26 修回日期:2015-12-21

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD22B00)。

第一作者:刘宇。主要研究方向:森林水文。Email: liuyu@bjfu.edu.cn 地址:100083北京市海淀区清华东路35号北京林业大学水土保持学院。

责任作者:郭建斌,教授,博士生导师。主要研究方向:林业生态工程、生态环境工程。Email: jianbinguo@bjfu.edu.cn 地址:同上。

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

provides basic data for cognizing and comprehensively evaluating the ecological service function of the pine-oak mixed forest in Huoditang forest region of Qinling Mountains, northwestern China, and offer theoretical basis for the water source protection of the Project of Diversion of Water from South to North.

**Key words** Qinling Mountains; mixed forest; forest soil; water conservation

森林是陆地上面积最大的生态系统,其水源涵养功能对于保护水资源、改善生态环境有重要意义<sup>[1]</sup>。这一功能是通过森林的林冠层、枯落物层和土壤层共同作用实现的,然而这3个作用层对森林水源涵养功能做出的贡献并不相同。研究表明,森林群落包括林冠层在内的地上部分持水量通常仅占其水源涵养能力的15%左右,林下土壤层则是发挥森林水源涵养功能的主体<sup>[2-3]</sup>。土壤层的水源涵养功能主要取决于土壤孔隙的大小和数量<sup>[4]</sup>,降水沿土壤毛管孔隙和非毛管孔隙下渗,一部分贮存在土壤中,另一部分汇集为地下径流。森林群落中植物根系的生长和微生物的活动改善了土壤孔隙状况,提高了土壤中非毛管孔隙的数量,是造成林地与其他土地利用类型的土壤水源涵养能力差异的主要原因。

火地塘林区处于秦岭南坡中段。秦岭是南水北调工程的重要水源地之一,是南水北调中线工程取水地——丹江口水库所在的汉江发源地。因此,该地区的林地,在产出用材、推动当地经济发展的同时,也发挥着涵养水源的重要作用。松栎(*Pinus* spp. - *Quercus* spp.)混交林是该地区分布较广泛的水源涵养林,由油松(*Pinus tabulaeformis*)、华山松(*Pinus armandii*)、锐齿栎(*Quercus aliena* var. *acutiserrata*)等优势树种组成。研究区域选定在“陕西秦岭森林生态系统国家野外科学观测研究站”所在的火地塘野外试验地,该区域植被类型以占火地塘林区面积40%的油松-华山松-锐齿栎型松栎混交林为主,林龄适中,分布集中且面积较大,在火地塘林区内具有较好的代表性。以往关于该地区松栎混交林的研究多集中在林分空间结构<sup>[5]</sup>、物种多样性<sup>[6]</sup>、土壤养分状况<sup>[7]</sup>等方面,对于松栎混交林林下土壤水源涵养能力的研究较少。除林地外,该区域还存在着一定面积的荒草地(荒地、草甸),以及小部分的农用地,不同的植被覆盖类型和频繁的人为扰动会引起土壤物理性质的变化,从而使这3种土地利用类型的土壤水源涵养功能产生差异。目前,对于森林水源涵养功能的评价应用主成分分析法<sup>[8]</sup>、层次分析法<sup>[9]</sup>、灰色关联分析法<sup>[10]</sup>的相关研究较多,本文在对火地塘林区松栎混交林地、荒草地、农用地3种不同土地利用类型的土壤水源涵养功能进行定性研究的同时,首次应用坐标综合评定法对该地区土壤水

源涵养功能进行定量评价,探讨森林对该地区土壤水源涵养能力的促进作用,以期为秦岭地区水源涵养林的保护提供依据,并为南水北调工程水源地的水源保护措施提供一定的参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区地处秦岭南坡中山地带中部火地塘林区,位于108°25'~108°30'E,33°25'~33°29'N,隶属于陕西省宁陕县,属汉江中上游子午河水系,总面积22.25 km<sup>2</sup>。试验地点位于林区内最大的自然集水区火地沟流域,流域面积7.29 km<sup>2</sup>,海拔1 644~2 130 m;气候为暖温带湿润山地气候,年均气温8~10℃,相对湿度77.1%;年均降水量1 000~1 200 mm,主要集中在7—8月份;流域内主要土壤类型为山地棕壤土,土层平均厚度约50 cm,成土母岩以花岗岩、片麻岩、片岩和变质砂岩为主。本研究区域属暖温带落叶阔叶林地带和北亚热带常绿落叶阔叶混交林地带,现存植被以20世纪60、70年代采伐后恢复起来的天然林为主,主要成林树种有:锐齿栎、油松、华山松、红桦(*Betula albo-sinensis*)、光皮桦(*B. luminifera*)、华北云杉(*Picea wilsonii*)、巴山冷杉(*Abies fargesii*)、山杨(*Populus davidiana*)等,主要草本有唐古草(*Thalictrum aquilegifolium*)、苔草(*Carex remotiuscula*)、野棉花(*Anemone vitifolia*)等,主要农作物为玉米(*Zea mays*)、大豆(*Glycine max*)。

本次试验在火地塘野外试验地内进行,在火地塘下游的2个支沟集水区内设立的临时样地中取样,火地塘野外试验地的气候条件、植被状况、土壤及其母质等与上述基本相同,其土壤质地均为林区常见的黏壤土<sup>[11]</sup>。

### 1.2 样地设置及样品采集

通过对2010年火地塘林区土地利用类型景观格局的调查资料进行综合整理(表1),发现在火地塘林区内所占面积最大的3种土地利用类型是以松栎混交林为主的针阔混交林地(57.15%)、荒草地(2.33%)和农用地(1.51%),因此选取这3种利用类型的土地进行研究,可以较好地代表该区域的土壤水源涵养能力,同时这3种土地利用类型分属不同的土地利用强度等级<sup>[12]</sup>,可以更直观地反映不同程度的人为干扰下土壤水源涵养能力的变化情况。

表1 火地塘林区主要土地利用类型所占面积

Tab. 1 Area of major land use types in Huoditang forest region

	土地利用类型 Land use type	面积 Area/hm <sup>2</sup>	百分比 Proportion/%
林地 Forest land	针叶林 Coniferous forest	307.83	13.83
	阔叶林 Broadleaved forest	528.63	23.75
	针阔混交林 Coniferous and broadleaved mixed forest	1 272.06	57.15
	荒草地 Grassland	51.86	2.33
	灌丛 Shrubs	31.38	1.41
	居民地 Residential area	0.45	0.02
	农耕地 Farmland	33.61	1.51
	合计 Total	2 225.82	100

现有的林木调查资料和前人研究中的取样情况<sup>[13-14]</sup>表明,火地塘林区松栎混交林主要分布在海拔1 300~1 900 m的区域,造林密度为700~2 200株/hm<sup>2</sup>,为了保证本研究在研究区的典型性和代表性,选取的样地应位于上述海拔区间内,为尽量消除因密度差异引起的土壤物理性质和持水能力差异,所选样地的造林密度应尽量接近平均造林密度水

平,以1 200~1 700株/hm<sup>2</sup>范围内为最佳。依照上述原则,于2011年5月,在秦岭火地塘野外试验地1支沟集水区(面积8.6 hm<sup>2</sup>)的合理海拔范围内,选择松栎混交林地、荒草地2种土地利用类型的坡面各1个,在2支沟集水区(面积7.2 hm<sup>2</sup>)的合理海拔范围内,选择松栎混交林、荒草地和农用地3种土地利用类型的坡面各1个,在各个坡面上密度在1 200~1 700株/hm<sup>2</sup>的林分内设置规格为20 m×20 m的临时样地,具体位置为:火地塘流域1支沟松栎混交林坡面的上部、下部各设置1个样地(编号分别为林1上,林1下),2支沟松栎混交林坡面中部设置1个样地(编号为林2),各样地概况见表2;在1支沟、2支沟的荒草地坡面中部,选取植被覆盖均匀的位置各设置1个样地(编号为荒1,荒2),样地内草本植物种类均为该地区常见物种,草本覆盖度为60%;农用地位于2支沟集水区的坡面上,种植作物为玉米,由于作物随坡面分布均匀,长势相同,因此沿坡面自上而下机械布设4个样地(编号为农1~农4),样地间隔为30 m。3种土地利用类型的土层厚度均为40 cm,在每个样地的上部、中部和下部各设置1个采样点开挖土壤剖面,用环刀分层(0~20 cm,20~40 cm)采取原状土,每层3次重复,供实验室分析使用。

表2 秦岭松栎混交林各样地概况

Tab. 2 Background information of pine-oak mixed forest plots in Qinling Mountains

样地编号 Sample plot No.	林分密度/ (株·hm <sup>-2</sup> ) Stand density/ (trees·ha <sup>-1</sup> )	林龄 Tree age/a	平均胸径 Average DBH/ cm	平均树高 Average tree height/m	树种组成 (总个体数) Tree species (Total)	海拔 Altitude/ m	坡度 Slope/ (°)	坡向 Aspect/ (°)	郁闭度 Canopy closure	土壤类型 Soil type
林1上 Plot 1 up	1 575	45	12.55	14.4	松 Pine 4 株 Oak 5 (63)	1 890	27	东南坡 Southeastern slope	0.73	棕壤 Burozem
林1下 Plot 1 down	1 725	45	10.75	13.2	松 Pine 2 株 Oak 1 (69)	1 542	24	东南坡 Southeastern slope	0.82	棕壤 Burozem
林2 Plot 2	1 250	50	13.20	16.5	松 Pine 4 株 Oak 1 (50)	1 904	32	西南坡 Southwestern slope	0.75	棕壤 Burozem

### 1.3 土壤物理性质和持水能力测定

在实验室进行土壤物理性质和持水性能的测定。土壤含水量的测定采用烘干法<sup>[15]</sup>;土壤密度和孔隙度的测定均采用环刀法<sup>[15]</sup>;土壤入渗特性的测定采用双环渗透法<sup>[15]</sup>。分别采用式(1)~(3)计算土壤饱和持水量、毛管持水量和非毛管持水量:

$$W_1 = 10\,000P_1h \quad (1)$$

式中: $W_1$ 为土壤饱和持水量,t/hm<sup>2</sup>;  $P_1$ 为土壤总孔隙度,% ;  $h$ 为土壤厚度,m。

$$W_0 = 10\,000P_0h \quad (2)$$

式中: $W_0$ 为土壤非毛管持水量,t/hm<sup>2</sup>;  $P_0$ 为土壤非毛管孔隙度,%。

$$W_c = 10\,000P_ch \quad (3)$$

式中: $W_c$ 为土壤毛管持水量,t/hm<sup>2</sup>;  $P_c$ 为土壤毛管孔隙度,%。

对松栎混交林的3个样地,取每个剖面每层3个重复的平均值代表该剖面每层的土壤物理性质和持水性能,取每个样地3个剖面的算数平均值代表该样地土壤物理性质和持水能力;对荒草地和农用地样地,取1个样地内3个剖面2个土层共18个重

复的算术平均值代表该样地土壤的物理性质和持水能力。

#### 1.4 数据处理

利用统计分析软件 R 3.2.2 对土壤物理数据进行分析处理,不同土地利用类型下各个样地间的土壤密度、孔隙度的差异采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和 Tukey HSD 多重比较进行差异显著性检验,显著性水平为 0.05。

#### 1.5 水源涵养能力评价方法

采用坐标综合评定法评价不同土地利用类型土壤的水源涵养功能<sup>[16]</sup>。坐标综合评定法应用多维空间理论,将评定对象视为多向量决定的空间点,以各点与最佳点间的距离对各点进行比较,可以对量纲不同的指标进行综合评价<sup>[17]</sup>。其基本步骤为:列出原始数据表,以  $\alpha_{ij}$  表示,其中“ $i$ ”表示不同土地利用类型,“ $j$ ”表示不同指标;采用公式(4)将其与每一指标中的最优者  $m_j$  作比较,组成相对值  $d_{ij}$ “矩阵坐标”;采用公式(5)计算第  $i$  个处理到标准点的距离;求各指标到标准点的距离之和  $\sum P_i^2$ ;按  $\sum P_i^2$  由小到大进行排序,综合值小者为最优。

$$d_{ij} = \alpha_{ij}/m_j \quad (4)$$

式中: $d_{ij}$ 为原始数据的相对值; $\alpha_{ij}$ 为原始数据; $m_j$ 为

每个指标中的最优值。

$$P_i = \sqrt{(1 - d_{ij})^2} \quad (5)$$

式中: $P_i$ 为第  $i$  个处理到标准点的距离。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同土地利用类型土壤密度与孔隙度

在相同的气候和土壤条件下,土地利用类型的不同导致覆盖土壤的植被类型有所差异,使土壤的物理性质存在明显差异。植被的存在改变了光热条件,从而影响了土壤的发育环境;同时,植被根系和枯落物也直接参与了土壤的成土过程<sup>[18]</sup>。在土壤物理性质中,密度与孔隙度影响着土壤的通气性和透水性,是决定土壤水源涵养能力的主要因素。

由表3可以看出,松栎混交林各样地的土壤密度均随土层深度加深而增大,0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤密度的差值变化范围在 0.23~0.38 g/cm<sup>3</sup>。表3数据显示,3种土地利用类型的土壤密度由小到大排序为:松栎混交林地(0.82 g/cm<sup>3</sup>) < 农用地(1.22 g/cm<sup>3</sup>) < 荒草地(1.25 g/cm<sup>3</sup>)。对不同土地利用类型的土壤密度进行单因素方差分析,结果表明,3种土地利用类型间的土壤密度差异极显著( $P = 0.00154 < 0.01$ )。

表3 松栎混交林各样地土壤密度与土壤孔隙度

Tab.3 Soil bulk density and soil porosity of the plots of pine-oak mixed forest

样地编号 Sample plot No.	土壤层次 Soil layer/cm	土壤密度 Soil bulk density/(g·cm <sup>-3</sup> )	总孔隙度 Total porosity/%	毛管孔隙度 Capillary porosity/%	非毛管孔隙度 Non-capillary porosity/%
林1上 Plot 1 up	0~20	0.82	75.29	48.21	27.08
	20~40	1.05	54.63	42.35	12.28
林1下 Plot 1 down	0~20	0.65	102.16	69.64	32.52
	20~40	1.03	53.38	30.54	22.84
林2 Plot 2	0~20	0.52	169.01	123.67	45.33
	20~40	0.83	69.95	52.75	17.20

由表3可知,松栎混交林3个样地的土壤总孔隙度均随土层深度的增加而减小,两层差值变化范围为 20.66%~99.06%,非毛管孔隙度和毛管孔隙度随土层深度的变化趋势与总孔隙度相同,变化范围分别为 9.68%~28.13%、5.86%~70.92%。由表4可知,不同土地利用类型的土壤总孔隙度由大到小排序为松栎混交林地(87.40%) > 荒草地(45.87%) > 农用地(38.95%),非毛管孔隙度由大到小排序为松栎混交林地(26.21%) > 荒草地(11.81%) > 农用地(5.31%)。单因素方差分析表明,不同土地利用类型间的土壤总孔隙度差异显著( $P = 0.0223 < 0.05$ ),非毛管孔隙度差异极显著

( $P = 0.00248 < 0.01$ )。这表明松栎混交林地土壤有着比农田和荒草地更高的孔隙度,更有利于水分的入渗。表4的结果还表明,松栎混交林地土壤的非毛管孔隙度占总孔隙度的比例最大(29.99%),农用地最小(13.63%)。

### 2.2 不同土地利用类型土壤蓄水性能

土壤饱和持水量是土壤毛管持水量和非毛管持水量之和,是土壤涵蓄水源潜力的最大值,也是反映土壤水源涵养能力的重要指标之一。毛管孔隙中的水分可以长时间保持在土壤中,主要用于植物根系吸收和土壤蒸发,非毛管孔隙中的水分主要受重力作用,贮蓄和运动速度快,因此,土壤非毛管孔隙持

表4 不同土地利用类型的土壤密度和土壤孔隙度

Tab.4 Soil bulk density and soil porosity among different land use types

土地利用类型 Land use type	土壤密度 Soil bulk density/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	总孔隙度 Total porosity/%	毛管孔隙度 Capillary porosity/%	非毛管孔隙度 Non-capillary density/%	非毛管孔隙所占比例 Percentage of non-capillary density/%
松栎混交林 Pine-oak mixed forest land	0.82 ± 0.07a	87.40 ± 16.46b	61.19 ± 13.58a	26.21 ± 3.43b	29.99
荒草地 Grassland	1.25 ± 0.02b	45.87 ± 1.98ab	34.06 ± 1.18a	11.81 ± 3.16a	25.75
农用地 Farmland	1.22 ± 0.03b	38.95 ± 2.24a	33.64 ± 0.90a	5.31 ± 1.54a	13.63

注:表中数据为平均值 ± 标准误;不同字母表示不同土地利用类型间土壤各物理指标的均值差异显著( $P < 0.05$ )。Notes: The data in the table are expressed as mean value ± standard error; the data with different letters indicate that they have significant differences at  $P < 0.05$  level.

水量是评价土壤水源涵养能力的重要指标<sup>[19-20]</sup>。由表5可知,3种土地利用类型的土壤饱和持水量表现出较大差异,由大到小排序为松栎混交林(349.60 mm) > 荒草地(183.48 mm) > 农用地(155.80 mm),这表明松栎混交林贮蓄降水和调节

水分的潜力明显优于荒草地和农用地。土壤非毛管持水量的排序与饱和持水量相同,为松栎混交林(104.84 mm) > 荒草地(47.24 mm) > 农用地(21.24 mm),可见松栎混交林土壤能够更快地吸收和贮存降水。

表5 不同土地利用类型的土壤蓄水能力

Tab.5 Water-holding capacity of soil among different land use types

土地利用类型 Land use type	体积含水率 Volume content of soil/%	自然含水量 Natural water content/mm	饱和持水量 Saturated moisture capacity/mm	毛管持水量 Capillary moisture capacity/mm	非毛管持水量 Non-capillary moisture capacity/mm
松栎混交林地 Pine-oak mixed forest land	37.99	151.96	349.60	244.76	104.84
荒草地 Grassland	31.77	127.08	183.48	136.24	47.24
农用地 Farmland	16.09	64.36	155.80	134.56	21.24

### 2.3 不同土地利用类型的土壤渗透性能

土壤渗透性能是土壤水源涵养功能的重要指标之一,与土壤的孔隙度尤其是非毛管孔隙度直接相关。土壤的渗透速率越大,降水经重力作用通过非毛管孔隙转入地下水的速度越快,土壤理水调洪能力越强。由火地塘林区3种土地利用类型0~20 cm土层的土壤入渗速率曲线(图1)可知,各土地利用类型土壤的入渗速率均随时间变化而逐渐降低,最终趋于稳定。土壤初渗速率由大到小排序为:松栎混交林地(10.60 mm/min) > 荒草地(8.21 mm/min) > 农用地(5.96 mm/min),土壤稳渗速率由大到小排序为松栎混交林地(3.30 mm/min) > 荒草地(2.82 mm/min) > 农用地(1.75 mm/min),松栎混交林地土壤的初渗速率与稳渗速率均最大。

### 2.4 不同土地利用类型土壤水源涵养功能评价

表6中, $P_1^2$ 为土壤密度,反映了不同土地利用类型土壤物理性质好坏; $P_2^2$ 为土壤非毛管持水量,反映了不同土地利用类型的土壤蓄水能力的强弱; $P_3^2$ 为土壤稳渗系数,反映了不同土地利用类型土壤入渗性能的优劣。 $\Sigma P_i^2$ 是不同土地利用类型土壤水源涵养功能的综合表现,由其排序可知:3种土地利用类型土壤水源涵养功能排序为松栎混交林地 > 荒草地 >

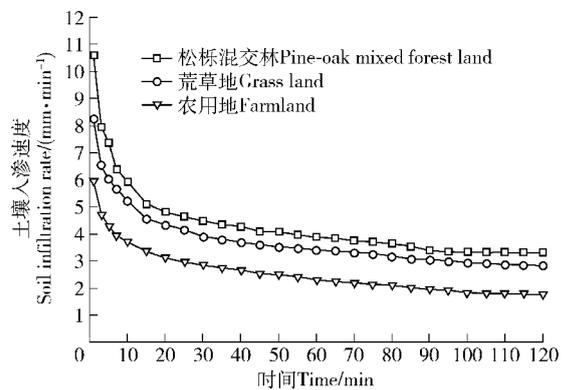


图1 不同土地利用类型0~20 cm土层土壤渗透特征

Fig.1 Soil infiltration characteristic of 0-20 cm layer among different land use types

农用地,松栎混交林地土壤的水源涵养功能最佳。

## 3 讨论

本研究表明,在秦岭火地塘林区火地沟流域,松栎混交林土壤的密度随土壤深度增加而变大,孔隙度随土壤深度增加而减小,这主要是因为林地枯落物腐烂分解后增加了上层土壤的腐殖质含量,有利于表层土壤形成土壤团粒体结构,这些土壤团粒体结构使上层土壤的密度降低,土壤孔隙增多,土质更

表6 不同土地利用类型土壤水源涵养功能评价

Tab. 6 Evaluation of water conservation function among different land use types

土地利用类型 Land use type	土壤物理性质 Soil physical property		土壤蓄水能力 Soil water-holding capacity		土壤入渗性能 Soil infiltration capacity		综合评价 Comprehensive evaluation	
	$P_1^2$	序次 Order	$P_2^2$	序次 Order	$P_3^2$	序次 Order	$\sum P_i^2$	序次 Order
	松栎混交林 Pine-oak mixed forest land	0.00	1	0.00	1	0.00	1	0.00
荒地 Grassland	0.28	3	0.30	2	0.02	2	0.60	2
农用地 Farmland	0.24	2	0.64	3	0.22	3	1.10	3

注:  $P_1^2$  为土壤密度,  $P_2^2$  为土壤非毛管持水量,  $P_3^2$  为土壤稳渗系数,  $\sum P_i^2$  是不同土地利用类型土壤水源涵养功能的综合表现。Notes:  $P_1^2$  represents soil bulk density,  $P_2^2$  represents soil non-capillary moisture capacity,  $P_3^2$  represents the stable infiltration coefficient of soil,  $\sum P_i^2$  reflects the comprehensive ability of water conservation function of soil for different land use types.

为疏松, 试验结果也与孙艳红等<sup>[18]</sup>、顾宇书等<sup>[21]</sup>和石小亮等<sup>[22]</sup>发现的森林土壤物理性质随土层深度变化的规律相一致。火地沟流域3种土地利用类型(松栎混交林地、荒地、农用地)中, 松栎混交林地的林下土壤密度最小, 总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度均最大, 这除了因为林地枯落物层的分解增加了土壤有机质含量外, 还由于林木复杂的根系系统的穿插、挤压作用增加了土壤的孔隙数量, 同时, 森林改善了该地区的光热条件, 土壤中生物、微生物的代谢更加旺盛, 使土壤的孔隙度增加、密度降低。

研究区域内不同土地利用类型的土壤蓄水性能存在着显著差别。松栎混交林土壤的饱和持水量、毛管持水量和非毛管持水量在3种土地利用类型中均最大。土壤的蓄水性能与土层的孔隙度(特别是非毛管孔隙度)和土层厚度有关, 在本研究中, 3种土地利用类型的地区土层厚度基本一致, 因此, 土壤的孔隙度成为决定土壤蓄水能力的主要指标。松栎混交林地受到的人为扰动较少, 有机质得以在林下土壤中大量积累, 形成地表“林褥层”<sup>[23]</sup>, 土质疏松, 土壤总孔隙度(87.40%)和非毛管孔隙度(26.21%)均最大, 因此其蓄水性能最好, 而农用地由于长期受到人为耕种、牲畜践踏的影响, 表层土壤板结、退化, 孔隙度降低, 蓄水性能变差。因此, 在该地区实施退耕还林可以有效改善当地土壤的物理性质, 从而提高土壤涵蓄水源的功能。

该研究区域松栎混交林土壤0~20 cm土层的初渗速率为10.60 mm/min, 稳渗速率为3.30 mm/min, 与前人的研究结果(初渗速率5.35~7.42 mm/min, 稳渗速率0.88~5.41 mm/min)<sup>[13]</sup>较接近。研究发现, 不同土地利用类型的土壤入渗能力有较大差距, 松栎混交林土壤入渗能力大于荒地, 土地利用类型不同, 地表凋落物以及地下根系根部及生长发育也会不同, 从而引起不同土地利用类型土壤入

渗能力间的差异, 这与潘紫文等<sup>[24]</sup>对林地与荒地土壤入渗能力的研究结果相同。同时, 研究也发现, 3种不同土地利用类型的土壤入渗能力排序与土壤孔隙度排序一致, 这表明土壤的入渗能力也与土壤的理化性质存在密切联系, 土壤孔隙度越大、土壤团聚体含量越多, 入渗能力越强, 这也验证了Helalia<sup>[25]</sup>的结论。松栎混交林土壤较高的孔隙度使得其纵向、横向的入渗能力都变强, 而农田土壤孔隙度低, 结构性差, 因此很快达到饱和, 加之农田土壤有机质含量低, 土体易分散, 堵塞土壤孔隙, 因此其初渗速率和稳渗速率均最低。以上结果表明, 在该地区营造以松栎混交林为主的水源涵养林可以有效提高土壤的入渗性能。

## 4 结 论

1) 火地沟流域松栎混交林地土壤密度随土层深度的增加而变大, 20~40 cm的土壤密度比0~20 cm的平均增加了0.30 g/cm<sup>3</sup>。土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度均随土层深度的增加而减小, 20~40 cm的总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度分别比0~20 cm平均减小了56.16%、38.63%、17.53%。

2) 不同土地利用类型间土壤密度和孔隙度差异较大, 松栎混交林土壤的密度(0.82 g/cm<sup>3</sup>)最小, 总孔隙度(87.40%)和非毛管孔隙度(26.21%)最大, 同时, 松栎混交林地土壤非毛管孔隙度占总孔隙度的比例最大(29.99%)。

3) 不同土地利用类型间的土壤蓄水能力差异较大, 其中松栎混交林土壤涵养水源总量(土壤饱和和持水量)(349.60 mm)、非毛管持水量(104.84 mm)均最大。3种土地利用类型的土壤入渗性能差异明显, 松栎混交林土壤稳渗速率为3.30 mm/min, 渗透性能最佳。

4) 运用坐标综合评定法对不同利用类型的土

地土壤潜在水源涵养能力进行评价,结果表明,松栎混交林地土壤潜在水源涵养功能最强(0.00),荒草地土壤次之(0.60),农用地土壤的潜在水源涵养功能最差(1.10),因此建议在该地区继续实施退耕还林措施,以改善当地土壤的水源涵养功能。

5)本文仅对火地塘林区不同土地利用类型土壤的潜在水源涵养功能进行了静态评价,如果想更全面地评价该地区松栎混交林的实际水源涵养能力,还需在建立小区定位的基础上,对其林冠层和枯落物层的水源涵养特征以及林地产流、产沙特征进行长期监测,同时,开展更多林分类型之间的对比也是很有必要的。

### 参 考 文 献

- [1] ANDREASSIAN V. Water and forests: from historical controversy to scientific debate [J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 29(1): 1-27.
- [2] 蒋秋怡. 林木地上部分的持水性能及其对林地水文学性质的影响[J]. *浙江林学院学报*, 1989, 6(2): 176-181.  
JIANG Q Y. Water capacity of aerial part biomass and its effects on hydrological characters in the forest land [J]. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 1989, 6(2): 176-181.
- [3] 郑郁善,郭海涛,徐凤兰,等. 福建含笑杉木混交林水源涵养功能差异研究[J]. *福建林学院学报*, 1997, 17(2): 126-130.  
ZHENG Y S, GUO H T, XU F L, et al. Hydrologic effect of mixed stands of *Michelia fujianensis* with *Cunninghamia lanceolata* [J]. *Journal of Fujian College of Forestry*, 1997, 17(2): 126-130.
- [4] 赵建生,王永明,杨新兵. 冀北山地森林土壤水文效应研究[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(3): 201-205.  
ZHAO J S, WANG Y M, YANG X B. Hydrological effects of forest soil in mountain area of northern Hebei [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(3): 201-205.
- [5] 黄青平. 秦岭火地塘水源涵养型松栎混交林空间结构特征研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2012.  
HUANG Q P. Research on stand structure of the pine-oak mixed forest in Huoditang Region of Qinling Mountains [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2012.
- [6] 吴昊,王得祥,黄青平,等. 环境因子对秦岭南坡中段松栎混交林物种多样性的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(9): 41-50.  
WU H, WANG D X, HUANG Q P, et al. Influence of environmental factors on species diversity of pine-oak mixed forest in the middle part of south Qinling Mountains [J]. *Journal of Northwest A & F University (Nature Science)*, 2012, 40(9): 41-50.
- [7] 吴昊. 秦岭山地松栎混交林土壤养分空间变异及其与地形因子的关系[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(5): 858-869.  
WU H. The relationship between terrain factors and spatial variability of soil nutrients for pine-oak mixed forest in Qinling Mountains [J]. *Journal of Natural and Resources*, 2015, 30(5): 858-869.
- [8] 高岗,琴富仓,姚云峰,等. 农牧交错带小流域防护林水源涵养功能研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2009, 23(8): 180-185.  
GAO G, QIN F C, YAO Y F, et al. Study on water conservation function of protective forest in watershed of farming-pastoral zone [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2009, 23(8): 180-185.
- [9] 汪永英,段文标. 小兴安岭南坡3种林型林地水源涵养功能评价[J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(5): 31-36.  
WANG Y Y, DUAN W B. Evaluation on water conservation capacity of three main forest types in southern slope of Xiaoxing'anling Mountains [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9(5): 31-36.
- [10] 蒋文伟,姜志林,余树全,等. 安吉主要森林类型水源涵养功能的分析与评价[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2002, 26(4): 71-74.  
JIANG W W, JIANG Z L, YU S Q, et al. Analysis and evaluation on water-holding function of main forest types in Anji Region [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2002, 26(4): 71-74.
- [11] 李珊珊. 秦岭火地塘林区土壤特性及系统分类研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2011.  
LI S S. Research on soil characteristics and taxonomic classification at Huoditang forest region in the Qinling Mountains [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2011.
- [12] 刘欢,张荣群,郝晋民,等. 基于半方差函数的银川平原土地利用强度图谱分析[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(23): 225-231.  
LIU H, ZHANG R Q, HAO J M, et al. Tupu analysis of land use intensity using semi-variance in Yinchuan Plain [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(23): 225-231.
- [13] 陈莉莉. 松栎混交林土壤特性及林地水源涵养功能研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2013.  
CHEN L L. Soil properties and water conservation function of pine and oak mixed forest [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2013.
- [14] 张巧明,王得祥,龚明贵,等. 秦岭火地塘林区不同海拔森林土壤理化性质[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(5): 69-73.  
ZHANG Q M, WANG D X, GONG M G, et al. Changes in physicochemical properties of forest soil along different altitudes in Huoditang of Qinling mountains [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(5): 69-73.
- [15] 马雪华,王淑元. 森林生态系统定位研究方法[M]. 北京:中国科学技术出版社, 1994: 91-94.  
MA X H, WANG S Y. Methods of long-term research on forest ecosystems [M]. Beijing: Science and Technology of China Press, 1994: 91-94.
- [16] 陈引珍,程金花,张洪江,等. 缙云山几种林分水源涵养和保土功能评价[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(2): 66-70.  
CHEN Y Z, CHENG J H, ZHANG H J, et al. Evaluation of soil and water conservation capacity of several forest in Jinyun Mountain [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(2): 66-70.
- [17] MCCULLOCH J S G, ROBINSON M. History of forest hydrology [J]. *Journal of Hydrology*, 1993, 150: 189-216.

- [18] 孙艳红,张洪江,程金花,等. 缙云山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报,2006,20(2):106-109.  
SUN Y H, ZHANG H J, CHENG J H, et al. Soil characteristics and water conservation of different forest types in Jinyun Mountain [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(2): 106-109.
- [19] 巍强,张秋良,代海燕,等. 大青山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报,2008,22(2):111-115.  
WEI Q, ZHANG Q L, DAI H Y, et al. Soil characteristics and water conservation of different forest types in Daqing Mountain [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(2): 111-115.
- [20] 王棣,吕皎. 油松混交林的水土保持及水源涵养功能研究[J]. 水土保持学报,2001,15(4):44-46.  
WANG L, LÜ J. Function of water and soil conservation of mixed forest of *Pinus tabulaeformis* [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(4): 44-46.
- [21] 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.  
GU Y S, XING Z K, HAN Y Z, et al. Soil physical properties and water conservation function of four typical conservation forest in upper reaches of Hunhe River [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2013, 41(1): 37-41.
- [22] 石小亮,张颖,单永娟,等. 云南省高原典型森林植被涵养水源功能研究[J]. 长江流域资源与环境,2015,24(8):1366-1372.  
SHI X L, ZHANG Y, SHAN Y J, et al. Study on water conservation function of typical forest vegetation in Yunnan Plateau [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(8): 1366-1372.
- [23] 张希彪,上官周平. 人为干扰对黄土高原子午岭油松人工林土壤物理性质的影响[J]. 生态学报,2006,26(11):3685-3695.  
ZHANG X B, SHANGGUAN Z P. Effect of human-induced disturbance on physical properties of soil in artificial *Pinus tabulaeformis* Carr. forests of the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(11): 3685-3695.
- [24] 潘紫文,刘强,终得海. 黑龙江省东部山区主要森林类型土壤水分的入渗速率[J]. 东北林业大学学报,2002,30(5):24-26.  
PAN Z W, LIU Q, ZHONG D H. Water penetration rate of soil in main forest types in the eastern mountainous area of Heilongjiang Province [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2002, 30(5): 24-26.
- [25] HELALIA A M. The relation between soil infiltration and effective porosity in different soils [J]. Agricultural Water Management, 1993, 24(8): 39-47.

(责任编辑 李 契  
责任编辑 蔡强国)