

DOI: 10.5846/stxb201808281846

张一璇, 史常青, 杨浩, 王占永, 赵廷宁, 闫焯琛, 安一喆. 永定河流域官厅水库南岸典型林分土壤饱和导水率研究. 生态学报, 2019, 39(18): - .
Zhang Y X, Shi C Q, Yang H, Wang Z Y, Zhao T N, Yan Y C, An Y Z. Saturated hydraulic conductivity of soils of typical forests of the south coast of Guanting Reservoir in Yongding River Watershed. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(18): - .

永定河流域官厅水库南岸典型林分土壤饱和导水率研究

张一璇¹, 史常青^{1,*}, 杨浩², 王占永³, 赵廷宁¹, 闫焯琛¹, 安一喆¹

1 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083

2 北京市园林绿化局, 北京 100013

3 河北省张家口市怀来县林业和草原局, 怀来 075400

摘要:为研究永定河流域官厅水库南岸生态水源保护林土壤饱和导水率(K_s)的特征, 科学评价水源保护林功能, 选取水源保护林典型林分与当地成林和非林地作对比, 采用方差分析、相关分析和因子分析的方法研究土壤理化性质对饱和导水率的影响并根据因子得分排名探究土壤通透性最好的林分。结果表明: (1) 土壤饱和导水率随土层深度增加而减小, 水源保护林中混交林的饱和导水率大于纯林接近于成林, 侧柏×山杏混交林的饱和导水率最高; (2) 因子分析结果表明, 影响饱和导水率最主要的因素为饱和含水量、容重和有机质含量; 次要因子为土壤砂粒、粉粒和粘粒含量, 土壤毛管孔隙度和非毛管孔隙度对本区域饱和导水率影响不大; (3) 综合因子得分排名分析, 以侧柏×山杏混交林的土壤通透性最好, 油松×山杏混交林次之。目前生态水源保护林对土壤通透性的改善优势明显, 造林颇具成效。

关键词:饱和导水率; 生态水源保护林; 土壤有机质; 土壤容重; 饱和含水量

Saturated hydraulic conductivity of soils of typical forests of the south coast of Guanting Reservoir in Yongding River Watershed

ZHANG Yixuan¹, SHI Changqing^{1,*}, YANG Hao², WANG Zhanyong³, ZHAO Tingning¹, YAN Yechen¹, AN Yizhe¹

1 College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Beijing Municipal Bureau of Landscape and Forestry, Beijing 100013, China

3 Forestry and Grassland Bureau of Huailai county, Zhangjiakou City, Hebei Province, Huailai 075400, China

Abstract: In order to explore the characteristics of saturated hydraulic conductivity (K_s) of the soils of the south coast of Guanting Reservoir in Yongding River watershed and to assess the function of water resource protection forests scientifically, this study used typical water resource protection forest stands as study objects, which were compared with local mature forests and non-forest land. Variance analysis, correlation analysis, and factor analysis methods were applied to investigate the influence of edaphic physical and chemical properties on saturated hydraulic conductivity, and the forest stands with the best soil permeability were screened according to the score ranking of influencing factors. The results showed that: (1) Saturated hydraulic conductivity decreased as the soil depth increased. The saturated hydraulic conductivity of mixed forests of water resource protection forests was greater than that of pure forests but similar to that of mature forests, among which *Platycladus orientalis* and *Armeniaca sibirica* mixed forest had the highest K_s value; (2) Factor analysis indicated that the

基金项目:北京市园林绿化局委托科技项目(2017HXFW SBXY006)

收稿日期:2018-08-28; 网络出版日期:2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: seqbj@126.com

primary factors affecting K_s were saturated moisture, soil bulk density, and soil organic matter content, while the secondary influencing factors were the contents of sand, silt, and clay in soil. Soil capillary porosity and non-capillary porosity had little effects on the K_s value; (3) According to the score ranking of the comprehensive factors, soil permeability in the *P. orientalis* and *A. sibirica* mixed forest was the best, followed by that in the mixed forest of *Pinus tabulaeformis* and *A. sibirica*. The present study demonstrated that ecological water conservation forests have the superiority in improving soil permeability, and that the afforestation project has shown remarkable achievements.

Key Words: saturated hydraulic conductivity; ecological water conservation forests; soil organic matter; soil bulk density; saturated moisture

土壤饱和导水率(soil saturated hydraulic conductivity, K_s)是表征土壤通透性的一个综合指标,即单位水势梯度作用下通过垂直于水流方向的单位面积土壤的水流量或渗流速度^[1]。饱和导水率越高,土壤通透性越好。土壤通透性的改善,不仅可以延缓降水形成的地表径流,减少土壤侵蚀,还能使更多的降水更快的进入土壤内,起到涵养水源的作用。

据国内外研究,影响土壤饱和导水率的因素主要有植被群落特征和土壤理化性质。由于树木根系生长具有树种特异性,根系通过穿插、网络及固结将土壤单粒粘结起来改变了土壤通透性^[2-3],因此不同树种的土壤饱和导水率不同。植物多样性可以显著增加土壤渗透能力,动态影响着土壤水文性质^[4]。据孟晨等人^[5]研究,土壤导水性表现为混交林>纯林>灌木林>草本>裸地。马思文等人^[6]对三峡库区人工防护林研究后认为,针阔混交林的饱和导水率最大,其次是阔叶混交林、针叶混交林、针叶纯林。饱和导水率由于土壤质地、容重、孔隙分布以及有机质等变量的影响而空间变异强烈^[7-8]。梁向锋等^[9]认为子午岭林区9种植被下土壤饱和导水率的主要影响因子是有机质含量、容重、>0.25mm土壤水稳性团聚体含量、毛管孔隙度和粘粒含量;王子龙等^[10]研究了退耕典型草地饱和导水率特征,认为水稳性大团聚体含量和有机质对饱和导水率产生显著正效应。而迟春明等^[11]对碱化盐土的研究表明,土壤碱度、盐度、结构系数、团聚度与饱和导水率的相关性均无显著统计学意义;张鼎华等^[12]得出沙地土壤饱和导水率与土壤有机质含量呈明显的负相关关系;刘春利等^[13]认为土壤饱和导水率的波峰对应土壤含水量的波谷,表明饱和导水率大土壤就不易保持水分,相反,土壤容易保持土壤水分。由以上研究结论可知,不同地区影响饱和导水率的因素不同,主要围绕在有机质含量、容重、孔隙状况和土壤粒径分布等土壤理化性质中,而且由于以上影响因素之间存在相互作用,导致各个因素对饱和导水率的影响十分复杂,具体地区应该具体分析。目前对饱和导水率的研究多集中在不同沙地、草地、滩涂地和盐碱地中^[14-15],研究区多选在南方红壤区、黄土高原区和喀斯特地区^[16-18],对森林土壤和植物的研究较少。

永定河是北京的母亲河,历史上又名不定河,但近几年多次出现断流现象。永定河流域涉及内蒙、山西、河北、北京和天津等地,永定河上游支流有桑干河、洋河、大清河等,最后汇流于官厅水库,因此,官厅水库的水量在很大程度上决定了永定河的水量。为了解决永定河的断流现象,近几年在永定河上游地区实施了大量的以植树造林为主的生态修复工程,其中,京冀生态水源保护林工程是北京市、河北省两地政府为提高森林植被涵水、净水能力,缓解首都水资源供需矛盾,促进区域经济社会协调发展而启动的建设合作项目。本文选取官厅水库南岸的生态水源保护林为研究对象,分析不同林分饱和导水率的特征,通过与当地成林的对比,评价目前水源保护林的造林成效;研究土壤饱和导水率的影响因素并根据因子得分排名得出土壤通透性最好的林分,科学评价水源保护林功能,从土壤方面提高永定河源头的的水源涵养能力,恢复永定河流域生态系统。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于张家口市怀来县东南部(115°36'E—115°45'E,40°13'N—40°18'N)(图1),官厅水库南岸,最

近处距离官厅水库不足 1 公里,是对官厅水库水质水量影响最为直接的示范区,生态区位极其重要。区域总面积达 50 平方公里,最高海拔 2292 米,最低海拔 520 米。该区地处温带半干旱区,属温带大陆性季风气候,四季分明,雨热同期,年均日照时数 3027 小时,全年无霜期 149 天。年平均气温 9.6℃,多年平均降水量 390mm。地貌形态主要有河川平原、丘陵和山地等类型,土壤类型为褐土,土壤质地为砂壤土,研究区主要栽植侧柏(*Platycladus orientalis* (L.) Franco)、油松(*Pinus tabuliformis* Carr.)、山杏(*Armeniaca sibirica* (L.) Lam.)等苗木,灌木植被主要有榛子(*Corylus heterophylla* Fisch.)、绣线菊(*Spiraea salicifolia* L.)等,草本植被主要有铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、委陵菜(*Potentilla chinensis* Ser.)等。

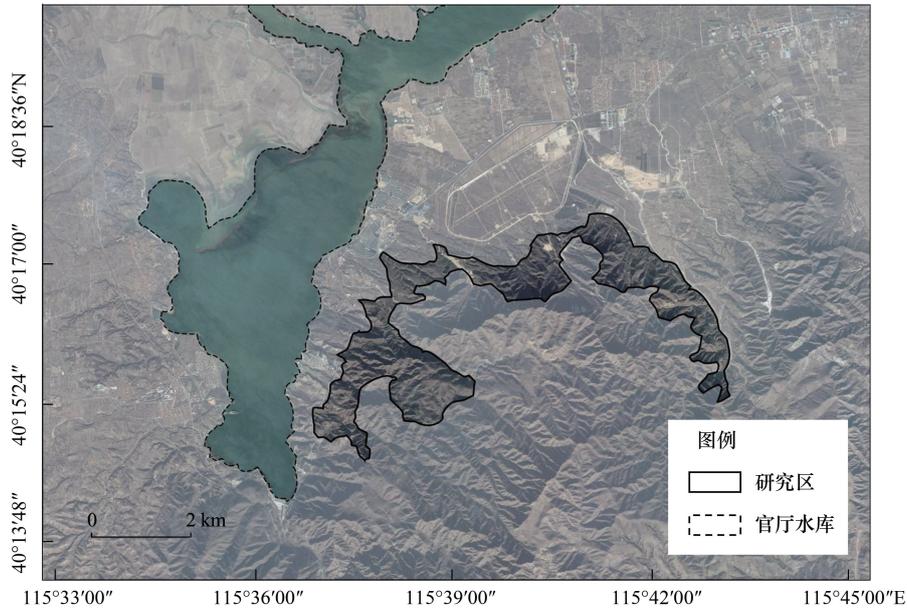


图 1 研究区位置图

Fig.1 Map of study area

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择与土样采集

2017 年 7 月,在保证立地条件基本一致的前提下,选取示范区内 5 种生态水源保护林典型林分(侧柏纯林、油松纯林、侧柏×山杏混交林、油松×山杏混交林、侧柏×油松混交林)作为研究样地并在附近选取立地条件相近的 3 种林分(侧柏成林、油松成林、山杏成林)作为成林对比,选取荒草地作为非林地对比,样地基本情况见表 1。

在选取的样地中布设 20m×20m 的样方,进行林分调查,调查结果见表 2。在样方中按照均匀分布和随机布点的原则设置 3 个采样点(深 60cm),进行土样采集,采样深度分为 3 层(0—20cm、20—40cm、40—60cm),每层均用环刀(环刀体积 100cm³,直径 5cm,高 5cm)取原状土以及自封袋取样,其中环刀取样每层设置 3 个重复,共采样 324 个、其中环刀样 243 个,所有样品带回实验室立即进行测定。

表 1 样地基本信息

Table 1 Basic information of sample plots

林分类型 Forest type	海拔 Altitude/m	坡度 Gradient/(°)	坡向 Aspect	林龄 Stand age/a	林分密度 Stand density/ (stem/hm ²)	混交比 M ixing ratio
侧柏纯林 I Pure forest of <i>Platycladus orientalis</i> I	640	14	北	9	880	/
油松纯林 II Pure forest of <i>Pinus tabuliformis</i> II	520	29	北	9	825	/

续表

林分类型 Forest type	海拔 Altitude/m	坡度 Gradient/(°)	坡向 Aspect	林龄 Stand age/a	林分密度 Stand density/ (stem/hm ²)	混交比 M ixing ratio
侧柏×山杏混交林 III Mixed forest of <i>Platycladus orientalis</i> and <i>Armeniaca sibirica</i> III	600	3	北	9	999	5:5
油松×山杏混交林 IV Mixed forest of <i>Pinus tabuliformis</i> and <i>Armeniaca sibirica</i> IV	594	5	北	9	1021	5:5
侧柏×油松混交林 V Mixed forest of <i>Platycladus orientalis</i> and <i>Pinus tabuliformis</i> V	1090	5	西	9	977	5:5
侧柏成林 VI Mature forest of <i>Platycladus orientalis</i> VI	540	19	西	20	800	/
山杏成林 VII Mature forest of <i>Armeniaca sibirica</i> VII	1080	5	西	21	750	/
油松成林 VIII Mature forest of <i>Pinus tabuliformis</i> VIII	1120	27	西南	20	670	/
荒草地 IX Grassland IX	500	6	南	/	/	/

表 2 样方林分调查

Table 2 Quadrat stand survey

林分类型 Forest type	主要灌木 Species of bushes	主要草本 Species of herbaceous
I	河朔茺花 <i>Wikstroemia chamaedaphne</i> 荆条 <i>Vitex negundo</i> L. var. <i>heterophylla</i> (Franch.) Rehd.	委陵菜 <i>Potentilla chinensis</i> Ser. 北柴胡 <i>Bupleurum chinense</i> DC. 地丁 <i>Corydalis bungeana</i> Turcz.
II	河朔茺花 <i>Wikstroemia chamaedaphne</i> 荆条 <i>Vitex negundo</i> L. var. <i>heterophylla</i> (Franch.) Rehd.	披针叶苔草 <i>Carex lanceolata</i> Boott 唐松草 <i>Thalictrum aquilegifolium</i> 白茅 <i>Imperata cylindrica</i> (L.) Beauv.
III	酸枣 <i>Ziziphus jujuba</i> Mill. var. <i>spinosa</i> (Bunge) Hu ex H. F. Chow 绣线菊 <i>Spiraea salicifolia</i> L.	铁杆蒿 <i>Artemisia gmelinii</i> 披针叶苔草 <i>Carex lanceolata</i> Boott
IV	荆条 <i>Vitex negundo</i> L. var. <i>heterophylla</i> (Franch.) Rehd. 绣线菊 <i>Spiraea salicifolia</i> L. 胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i> Turcz.	铁杆蒿 <i>Artemisia gmelinii</i> 披针叶苔草 <i>Carex lanceolata</i> Boott 百里香 <i>Thymus mongolicus</i> Ronn.
V	河朔茺花 <i>Wikstroemia chamaedaphne</i> 胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i> Turcz.	铁杆蒿 <i>Artemisia gmelinii</i> 披碱草 <i>Elymus dahuricus</i> Turcz.
VI	河朔茺花 <i>Wikstroemia chamaedaphne</i> 绣线菊 <i>Spiraea salicifolia</i> L.	委陵菜 <i>Potentilla chinensis</i> Ser. 铁杆蒿 <i>Artemisia gmelinii</i>
VII	鼠李 <i>Rhamnus davurica</i> Pall. 荆条 <i>Vitex negundo</i> L. var. <i>heterophylla</i> (Franch.) Rehd.	委陵菜 <i>Potentilla chinensis</i> Ser. 花苜蓿 <i>Medicago ruthenica</i> (L.) Trautv.
VIII	柠条 <i>Caragana Korshinskii</i> Kom. 河朔茺花 <i>Wikstroemia chamaedaphne</i>	沙参 <i>Adenophora stricta</i> Miq. 唐松草 <i>Thalictrum aquilegifolium</i>
IX	/	铁杆蒿 <i>Artemisia gmelinii</i> 委陵菜 <i>Potentilla chinensis</i> Ser.

1.2.2 测定方法

土壤饱和导水率测定采用恒定水头法,计算方法见公式(1),结果取平均值。

$$K_{fs} = \frac{10QL}{A\Delta HT} \quad (1)$$

式中: K_s 为饱和导水率 (mm/min); Q 为时间 t 内的出流量 (ml); L 为水流路径的直线距离 (cm); A 为水流经过的横截面积 (cm²); ΔH 为渗流路径始末断面的总水头差 (cm); T 为出流时间 (min)。

土壤水分的运动与温度有关,为了便于统一对比,下文所列数据统一用标准温度 10℃ 时的饱和导水率表示,其他温度下所测得的导水率要换算成标准温度下的导水率,具体换算方法采用哈赞公式(2):

$$K_{10} = \frac{K_t}{0.7 + 0.03t} \quad (2)$$

式中: K_{10} 为 10℃ 时的饱和导水率 (mm/min); K_t 为 t ℃ 时的饱和导水率 (mm/min); t 为测量时的水温 (℃)。

土壤质地采用吸管法测定,并参照国际制来划分土壤质地类型(砂粒:0.02—2mm,粉粒:0.002—0.02mm,粘粒:<0.002mm);饱和含水量、容重、毛管孔隙度和非毛管孔隙度采用环刀法测定;土壤有机质采用重铬酸钾氧化-外加热法来测定。

1.3 数据处理

采用 origin 软件作图,R 语言 3.3.1 软件对土壤饱和导水率进行单因素方差分析(One-way ANOVA)并利用 TukeyHSD 标注差异显著性;用双因素方差分析(Two-way ANOVA)研究不同林分类型和土壤深度对土壤理化性质的影响;对饱和导水率和土壤理化性质进行相关性分析和显著性检验,并对所得矩阵按方差最大法旋转,用主成分法进行因子分析(R 语言软件对数据矩阵已做标准化处理),通过方差贡献率划出公共因子,在了解每个公共因子的具体含义后,采用回归估计法计算样本的综合得分^[19]。土壤理化性质参数指标进行相关性分析和因子分析时,均使用各参数指标的平均值。

2 结果与讨论

2.1 不同林分土壤饱和导水率特征

图 2 是包括非林地在内的 9 种样地(侧柏纯林、油松纯林、侧柏×山杏混交林、油松×山杏混交林、侧柏×油松混交林、侧柏成林、油松成林、山杏成林、荒草地)不同土层深度的土壤饱和导水率。首先从整体土壤分层来看,越深层的土壤,饱和导水率越小。0—20cm 土层的饱和导水率是 40—60cm 土层的 2.77—17.36 倍。这是因为 0—20cm 土层有机质含量高,土壤通透性好,随着土壤深度的增加,土壤结构较为紧实,总孔隙度逐渐减小,导致较深层次土壤的通气透水能力较差^[20]。可以推断,植被对表层土壤通透性的改善大于深层土壤。

按土层深度分析每一层不同林分的饱和导水率,由于林分整体的土壤通透性受饱和导水率数值最小的土层的影响,所以将 40—60cm 土层作为代表进行分析。在 40—60cm 土层,饱和导水率的范围为 0.02—1.98mm/min,山杏成林的 K_s (1.98mm/min) > 油松成林的 K_s (1.2mm/min) > 侧柏×山杏混交林的 K_s (0.91mm/min) > 油松×山杏混交林的 K_s (0.40mm/min) > 侧柏成林的 K_s (0.26mm/min) > 侧柏×油松混交林的 K_s (0.22mm/min) > 油松纯林的 K_s (0.14mm/min) > 侧柏纯林的 K_s (0.11mm/min) > 荒草地的 K_s (0.02mm/min)。总体可以看出,在生态水源保护林中,混交林的饱和导水率 > 纯林的饱和导水率,混交林之间的饱和导水率相差不大,其中侧柏×山杏混交林的饱和导水率最高。生态水源保护林与成林对比可知,混交林的饱和导水率已接近侧柏成林,在 40—60cm 土层,侧柏×山杏混交林和油松×山杏混交林的饱和导水率要大于侧柏成林,侧柏×山杏混交林的饱和导水率接近于油松成林。这是由于侧柏属于浅根性树种,根系水平分布。在 40—60cm 土层,生长快、深根性的山杏根系更发达,因此与山杏混交的林分对土壤渗透性的改善能力更好。其次,生态水源保护林的饱和导水率远远大于非林地,说明生态水源保护林确实改良了土壤结构,提高了土壤通透性,目前水源保护林造林颇具成效。

2.2 土壤理化性质对饱和导水率的影响

表 3 是 9 种样地的双因素重复测量方差分析结果,由结果可知,林分类型对饱和导水率、砂粒含量、粉粒含量、粘粒含量、饱和含水量、容重和有机质含量均有极显著影响,土壤深度对饱和导水率、粘粒含量、饱和含水量、容重和有机质含量有极显著影响,林分类型和土壤深度的交互作用对饱和导水率、粘粒含量、饱和含水

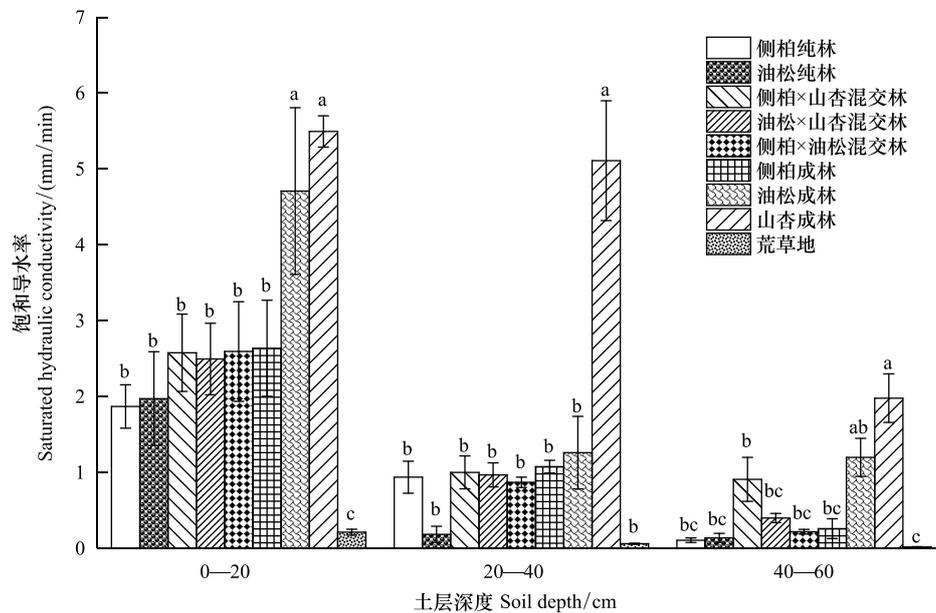


图2 不同林分土壤饱和和导水率

Fig.2 Soil saturated hydraulic conductivity of different stands

量和有机质含量有极显著影响,对粉粒含量有显著影响。这表明林分类型对土壤理化性质的改变有显著作用,一方面植被类型不同其根系结构不同,根系通过穿插和根际生物活动改变了土壤团粒结构和孔隙性;另一方面,林分树种组成不同造成了林下动植物残体和微生物分解后进入土壤中养分的差异。此外,随着土壤深度增加,土壤理化性质也会改变。土壤深度对粘粒含量有影响,而对砂砾含量与粉粒含量影响不明显,说明同一林分土壤质地有相对的稳定性。

表3 不同林分土壤理化性质双因素重复测量方差分析

Table 3 Two-way repeated measures ANOVA of soil physical and chemical properties of different stands

因子 Factor	自由度 DF	饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity/ (mm/min)	砂粒 Sand/%	粉粒 Silt/%	粘粒 Clay/%	饱和含水量 Saturated moisture/%	容重 Bulk density /(g/cm ³)	有机质含量 Organic matter/%
林分类型 Forest type	8	22.79 **	4.959 **	10.217 **	31.283 **	3.624 **	12.101 **	41.45 **
土壤深度 Soil depth	2	16.89 **	2.849	1.929	18.726 **	11.32 **	16.275 **	78.96 **
交互作用 Interaction	16	10.96 **	1.672	2.432 *	6.756 **	8.183 **	1.371	16.02 **

** 表示在 0.01 水平上显著相关; * 表示在 0.05 水平上显著相关

以上土壤理化性质的改变都可能造成饱和导水率的差异,为进一步探明土壤理化性质中对饱和导水率起主导作用的因素,本文选取了土壤砂粒含量、粉粒含量、粘粒含量、饱和含水量、容重、毛管孔隙度、非毛管孔隙度和有机质含量 8 个与土壤饱和导水率有关的土壤理化性质作为变量进行研究。首先用 R 语言统计软件进行相关分析与显著性检验,结果如表 4,8 个变量与饱和导水率的相关系数绝对值排序为:有机质含量>饱和含水量>容重>非毛管孔隙度>粉粒含量>毛管孔隙度>粘粒含量>砂粒含量,饱和导水率与容重和粘粒含量成负相关关系,与其他变量成正相关关系,且饱和导水率与有机质含量、饱和含水量和容重表现为极显著相关关系。这与目前大部分研究结果一致^[21-22],一般而言粘粒含量越高的土壤孔隙越小^[23],渗透能力越低。

表 4 饱和导水率与土壤理化性质的相关性分析 ($n=243$)Table 4 Correlation coefficients among saturated hydraulic conductivity and soil physical and chemical properties ($n=243$)

	饱和导水率/ (mm/min)	砂粒/%	粉粒/%	粘粒/%	饱和含水量/%	容重/ (g/cm ³)	非毛管孔隙度/%	毛管孔隙度/%	有机质含量/%
饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity/(mm/min)	1								
砂粒 Sand/%	0.047	1							
粉粒 Silt/%	0.317	-0.455 *	1						
粘粒 Clay/%	-0.050	-0.998 **	0.447 *	1					
饱和含水量 Saturated moisture/%	0.673 **	-0.101	0.324	0.098	1				
容重 Bulk density/(g/cm ³)	-0.609 **	0.193	-0.240	-0.192	-0.897 **	1			
非毛管孔隙度 Non-capillary porosity/%	0.327	-0.108	0.102	0.108	0.260	0.280	1		
毛管孔隙度 Capillary porosity/%	0.298	0.004	0.188	-0.005	0.625 **	-0.522 **	-0.591 **	1	
有机质含量 Organic matter/%	0.738 **	-0.103	0.480 *	0.099	0.625 **	-0.483 *	0.254	0.317	1

** 表示在 0.01 水平上显著相关; * 表示在 0.05 水平上显著相关

表 5 土壤理化性质对饱和导水率影响的因子分析

Table 5 Factor analysis on soil physical and chemical properties affecting saturated hydraulic conductivity

特征值 Eigenvalue	贡献率 Contribution/%	公因子 Common factor	砂粒 Sand/%	粉粒 Silt/%	粘粒 Clay/%	饱和含水量 Saturated moisture/%	容重 Bulk density/ (g/cm ³)	非毛管孔隙度 Non-capillary porosity/%	毛管孔隙度 Capillary porosity/%	有机质含量 Organic matter/%
2.86	35.73	1	-0.02	0.39	0.02	0.96	-0.88	0.30	0.57	0.77
2.31	28.83	2	-0.98	0.60	0.98	0.05	-0.12	0.06	0.00	0.12
1.58	19.71	3	-0.04	-0.01	0.04	-0.07	0.02	0.94	-0.82	0.11

相关性分析表明的是简单自变量之间的相互关系,受因子间相互影响的作用,单纯以相关系数往往不能正确反映它们之间的真正关系。因子分析是一种把多个变量化为少数几个综合变量的多变量分析方法,用有限个不可观测的隐变量来解释原始变量之间的相关关系。相关分析中各变量间表现出较好的相关性是进行因子分析的前提,由表 4 可知,原变量适合进行因子分析。表 5 是将变量按方差最大法旋转后,通过分析方差贡献率划出公共因子,并且计算各个变量在公因子中的负荷,得出每个变量在不同公因子中的作用大小。由旋转后的因子载荷矩阵可以看出,公因子 1 的特征值为 2.86,占全部方差的 35.73%,公因子 1 在饱和含水量、容重和有机质含量上的载荷值都很大,可视为反映土壤孔性的公共因子,其中以饱和含水量影响最大,容重次之;公因子 2 的特征值为 2.31,占全部方差的 28.83%,公因子 2 在砂粒含量、粉粒含量、粘粒含量上的载荷值很大,可视为反映土壤质地的因子;公因子 3 的特征值为 1.58,占全部方差的 19.71%,公因子 3 在非毛管孔隙度和毛管孔隙度上的载荷值很大,其对土壤饱和导水率的影响不大,可以忽略不计。前 3 个公因子累计方差贡献率为 84.27%,能够反映全部数据的大部分信息。饱和含水量反映了土壤总孔隙度和持水特性,容重反映了自然土壤孔隙性,有机质含量促进了土壤结构形成。总孔隙度大,大小孔隙分配适当,团粒之间排列疏松,则土壤通透性好。因此饱和含水量、容重和有机质含量是影响饱和导水率的最主要因素。土壤质地主要是单个土粒的数量和级别分析,且变化速度缓慢,主要通过粘粒含量影响土壤孔隙,因此间接影响了饱和导水率。非毛管孔隙度和毛管孔隙度对饱和导水率影响较弱,可能是由于本区域的土壤质地为砂壤土,持水孔隙不足,不同林分毛管孔隙占土壤体积的比例相差不大。

2.3 不同林分土壤通透性综合评价

因子分析模型建立后,还有一个重要的作用是应用因子分析模型去评价每个样本在整个模型中的地位,即进行综合评价。本文采用定水头法测定土壤饱和导水率,但是野外取样时不同测量点的测量结果会有差

异,并且较大空间尺度上需要采集大量样本。由于直接测量方法费时费力,国内外众多学者通过土壤转换函数间接获取土壤水力参数,即用土壤理化性质参数来构建估算土壤水力学参数。由此得到启发,评价不同林分土壤通透性可以利用因子分析模型中的因子得分排名,即以各因子的方差贡献率为权,由各因子的线性组合得到综合评价指标函数并计算综合得分,根据得分排序得到不同林分土壤通透性高低的排名。结果如表6,可以得出生态水源保护林中土壤通透性的排序为:侧柏×山杏混交林>油松×山杏混交林>侧柏×油松混交林>油松纯林>侧柏纯林,其中侧柏×山杏混交林的土壤通透性要好于油松成林。

表6 不同林分土壤通透性综合评价得分

Table 6 Comprehensive score of soil permeability of different stands

排名 Ranking	1	2	3	4	5	6	7	8	9
林分类型 Forest type	山杏 成林	侧柏 成林	侧柏×山 杏混交林	油松 成林	油松×山 杏混交林	侧柏×油 松混交林	油松 纯林	侧柏 纯林	荒草地
综合得分 Comprehensive score	0.710	0.552	0.348	0.314	0.055	-0.298	-0.407	-0.580	-0.693

3 结论

(1) 土壤饱和导水率随土层深度增加而减小,植被对表层土壤通透性的改善大于深层土壤。水源保护林中混交林的饱和导水率大于纯林接近于成林,待水源保护林完全郁闭时会发挥比成林更好的水源涵养效果。与非林地对比可知,目前水源保护林对土壤通透性的改善优势明显,造林颇具成效。

(2) 林分类型对土壤理化性质的改变有显著作用,这是由于林分组成不同造成根系结构、林下动植物残体和微生物不同,进而导致了土壤团粒结构、孔隙性和土壤养分的差异。土壤理化性质中影响饱和导水率最主要的因素为饱和含水量、容重和有机质含量;次重要因子为土壤砂粒、粉粒和粘粒含量,土壤毛管孔隙度和非毛管孔隙度对本区域饱和导水率影响不大。饱和导水率是评价水源保护林功能的重要指标,要从土壤方面提高林分的水源涵养能力,需要对其主要影响因子进行改良,通过深根性树种和浅根性树种搭配,提高根系对土壤空间的利用,从而改变土壤孔性;通过提高林分物种多样性增加土壤有机质含量来改善土壤结构。

(3) 从综合因子得分排名来看,以侧柏×山杏混交林的土壤通透性最好,油松×山杏混交林次之。为了恢复永定河流域的生态系统,在源头涵养水源,增加官厅水库的流量,为永定河提供补给,日后京冀生态水源保护林工程可优先考虑种植针阔混交林,尤其是侧柏×山杏混交林。

(4) 由于实验条件和工程区所在位置的限制,本论文尚存在不足之处。在今后的研究中应考虑年内季节和年际变化对饱和导水率的影响,选取更大尺度的区域进行研究,使结论更具有信服力。

参考文献 (References):

- [1] 姚淑霞, 赵传成, 张铜会. 科尔沁不同沙地土壤饱和导水率比较研究. 土壤学报, 2013, 50(3): 469-477.
- [2] 蔡鲁, 朱婉芮, 王华田, 张光灿, 刘霞, 杨吉华, 王延平. 鲁中南山地6个造林树种根系形态的比较. 中国水土保持科学, 2015, 13(2): 83-91.
- [3] 李建兴, 何丙辉, 谌芸. 不同护坡草本植物的根系特征及对土壤渗透性的影响. 生态学报, 2013, 33(5): 1535-1544.
- [4] Wang S, Fu B J, He C S, Sun G, Gao G Y. A comparative analysis of forest cover and catchment water yield relationships in northern China. Forest Ecology and Management, 2011, 262(7): 1189-1198.
- [5] 孟晨, 牛健植, 骆紫藤, 杜晓晴, 武晓丽. 鹞峰地区不同植被群落土壤性质及饱和导水率特征. 水土保持学报, 2015, 29(3): 156-160.
- [6] 马思文, 张洪江, 程金花, 李明峰, 王平. 三峡库区典型城郊防护林土壤饱和导水率特征研究. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2018, 42(5): 99-106.
- [7] Western A W, Blöschl G, Grayson R B. Geostatistical characterisation of soil moisture patterns in the Tarrawarra catchment. Journal of Hydrology, 1998, 205(1/2): 20-37.
- [8] Warrick A W, Nielsen D R. Spatial variability of soil physical properties in the field//Hillel D, ed. Applications of Soil Physics. New York:

Academic Press, 1980: 319-344.

- [9] 梁向锋, 赵世伟, 张扬, 华娟. 子午岭植被恢复对土壤饱和导水率的影响. 生态学报, 2009, 29(2): 636-642.
- [10] 王子龙, 赵勇钢, 赵世伟, 黄菁华, 杜璨, 尚应妮. 退耕典型草地土壤饱和导水率及其影响因素研究. 草地学报, 2016, 24(6): 1254-1262.
- [11] 迟春明, 王志春. 碱化盐土饱和导水率特征与影响因素研究. 土壤通报, 2014, 45(3): 601-607.
- [12] 张鼎华, 翟明普, 贾黎明, 林平. 沙地土壤有机质与土壤水动力学参数的关系. 中国生态农业学报, 2003, 11(1): 74-77.
- [13] 刘春利, 邵明安. 黄土高原坡地表层土壤饱和导水率和水分含量空间变异特征. 中国水土保持科学, 2009, 7(1): 13-18.
- [14] 孙丽. 科尔沁沙丘—草甸相间地区表土饱和导水率的土壤传递函数研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014.
- [15] 姚荣江, 杨劲松, 张同娟, 李芙蓉, 王相平, 吴晓卫. 滩涂围垦农田土壤饱和导水率的影响因素及转换函数研究. 中国生态农业学报, 2014, 22(7): 790-797.
- [16] 方堃, 陈效民, 张佳宝, 王伯仁, 黄晶, 甘再福. 红壤地区典型农田土壤饱和导水率及其影响因素研究. 灌溉排水学报, 2008, 27(4): 67-69.
- [17] 甘淼, 贾玉华, 李同川, 毛娜, 赵明阳. 黄土区坡沟系统容重、饱和导水率和土壤含水量变化分析. 干旱区研究, 2018, 35(2): 315-324.
- [18] 张川, 陈洪松, 张伟, 聂云鹏, 叶莹莹, 王克林. 喀斯特坡面表层土壤含水量、容重和饱和导水率的空间变异特征. 应用生态学报, 2014, 25(6): 1585-1591.
- [19] 王斌会. 多元统计分析及 R 语言建模(第四版). 广州: 暨南大学出版社, 2016: 185-186.
- [20] 汪明星. 重庆山地丘陵区紫色土饱和导水率传递函数研究[D]. 重庆: 西南大学, 2017.
- [21] 张君玉, 程金花, 吕湘海, 张友焱, 王彬俨, 孙龙. 晋西不同土地利用方式下土壤饱和导水率的影响因素. 水土保持通报, 2013, 33(6): 57-61.
- [22] 陈效民, 潘根兴, 王德建, 李宝山. 太湖地区农田生态环境中土壤饱和导水率研究. 水土保持通报, 2000, 20(5): 11-12, 59-59.
- [23] 胡传旺, 王辉, 刘常, 袁红, 李裕元. 南方典型土壤水力特征差异性分析. 水土保持学报, 2017, 31(2): 97-102.