

# 太行山低山丘陵区不同植被类型 土壤渗透特性及影响因素

陈家林, 孔玉华, 裴丙, 付梦瑶, 郭二辉, 杨喜田

(河南农业大学 林学院, 郑州 450002)

**摘要:**为了探讨太行山低山丘陵区不同植被恢复类型土壤水分入渗规律及影响因素,采用双环刀入渗法和相关分析、典型相关分析方法,研究了该区域不同植被群落表层土壤的入渗特性,对土壤入渗过程进行模拟,并深入探讨了土壤入渗的影响因素。结果表明:(1)从裸地、草地、灌草地、灌丛到乔灌木林地,土壤渗透性能不断增加;不同植被类型0—10 cm层土壤渗透速率大于10—20 cm层土壤渗透速率;土壤初渗速率和稳渗速率最大值均出现在侧柏林地,分别为5.96 mm/min和4.76 mm/min。(2)土壤入渗模型拟合结果表明 Philip 入渗模型对不同植被类型土壤入渗过程拟合效果最好,Kostiakov 入渗模型拟合效果次之,Horton 入渗模型拟合效果最差,不适合用于描述该区域土壤入渗特征。(3)土壤渗透特性指标与土壤容重、总孔隙度、有机质质量分数、根质量密度、根体积密度、根平均直径存在显著相关关系( $p < 0.05$ );土壤理化性质指标和根系结构指标中对土壤渗透性能产生影响作用最大的分别是总孔隙度和根平均直径,典型相关负荷量分别为1.299,1.084。

**关键词:**土壤入渗;植被类型;土壤理化性质;根系结构

中图分类号:S714.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)04-0060-06

## Characteristics and Influencing Factors of Soil Infiltration Under Different Vegetation Types in Hilly Region of Taihang Mountains

CHEN Jialin, KONG Yuhua, PEI Bing, FU Mengyao, GUO Erhui, YANG Xitian

(College of Forestry, He'nan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** To analyze characteristics and influencing factors of soil infiltration under different vegetation types in hilly region of Taihang Mountains, soil infiltration processes of different vegetation types were simulated to examine their characteristics and their influencing factors were also explored through double-ring method, correlation analysis and canonical correlation analysis. The results showed that: (1) soil infiltration capability increased in the order: bare-land < grassland < bushwood < bushwood land < arbor and bushwood land, which was higher in 0—10 cm layer than in 10—20 cm layer under different vegetation types, the highest mean value of initial soil infiltration rate (5.96 mm/min) and stable soil infiltration rate (4.76 mm/min) appeared in *Platycladus orientalis* land; (2) simulated infiltration processes with Philip and Kostiakov models showed that these two models described the infiltration better than Horton model; (3) there was the significant relationship ( $p < 0.05$ ) between soil permeability index and soil bulk density, total porosity, soil organic matter content, root weight density, root volume density, root average diameter. With respect to the soil infiltration capacity, the most important indicators of soil physical and chemical characteristics and root structure were total porosity and root average diameter, and the canonical correlation coefficients of which were 1.299 and 1.084, respectively.

**Keywords:** soil infiltration; vegetation restoration types; soil physical and chemical properties; root structure

土壤水分入渗过程和渗透性能影响着土壤对水分  
传输及再分配能力,进而对坡面地表径流和土壤水分

产生重要影响,是植被恢复过程中水文效应研究的重  
要指标<sup>[1-4]</sup>,土壤的渗透性能越好,地表径流就越少,土

壤的侵蚀量也会相应地减少。土壤水分入渗规律探讨是明确地表径流产生机制的前提和基础<sup>[5]</sup>,对水土流失防控及土壤侵蚀防治具有重要意义。不同植被类型由于物种组成、生物学特性和空间结构的不同,其土壤水文效应存在较大差异<sup>[6]</sup>,从而也反映出不同植被对土壤理化性状的改良效果及不同生境下土壤层蓄水能力<sup>[7]</sup>。目前,关于不同植被类型土壤渗透性能的研究涉及紫色土区、黄土丘陵区等多种典型研究区<sup>[8-13]</sup>,结果具有明显的地域特征且部分研究仅仅止步于不同植被类型下土壤渗透性能差异性的层面,对土壤入渗的影响因素及影响机理探讨较少。已有的影响因素研究中多涉及土壤质地、土壤理化性质、下垫面性质等直接或间接因素<sup>[14-16]</sup>,较少探讨根系结构对土壤渗透特性的影响。影响因素的分析方法中,相关分析和主成分分析较为常见,鲜少应用典型相关分析法。

河南太行山低山丘陵区生态环境恶劣,水土流失十分严重,经过几十年的生态重建,当地人工植被和自然植被都得到了一定程度的恢复,同时,植被群落表层土壤入渗性能也随之发生了改变。了解该区域植被恢复过程中土壤入渗性能变化及其演变机理,有助于在今后植被恢复工作中实施正向干扰,加快生态恢复进程。本文以该区域典型草本、灌木和乔木植物群落为研究对象,裸地作为参照,对不同植被类型土壤入渗特征及过程进行研究,构建土壤入渗模型,同时深入探讨土壤理化性质和根系结构对土壤渗透性能的影响作用,为该地区植被恢复及水土流失防控工作提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于河南省济源市境内,隶属于中国森林生态系统定位研究网络(CFERN)的黄河小浪底森林生态系统定位研究站(35°01'N,112°28'E),平均海拔 410 m。该区属暖温带大陆性季风气候,年均气温 13.1℃,全年日照时数为 2 367.7 h,年平均降水量 641.7 mm,降水分布不均匀,多集中在 6—9 月,占全年降雨量的 68.3%。研究区土壤主要为在花岗片麻岩的土壤母质上发育而来的山地褐土,有效土壤厚度较薄且保肥保水能力差。研究区植被包括人工纯林及阔叶林破坏后自然形成的次生灌草丛。乔木代表性树种有侧柏(*Platycladus orientalis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)和栓皮栎(*Quercus variabilis*)等。天然植被灌木组成种类主要有:酸枣(*Ziziphus jujube*)、荆条(*Vitex negundo*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)等。草本主要有:荩草(*Arthraxon hispidus*),茵陈蒿(*Artemisia capillaries*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、野艾蒿(*Artemisia lavandulaefolia*)等。

2 材料与方法

2.1 样地选择

依据研究区域植被特征,选择坡度、坡向、坡位基本一致的不同植被类型的样地:草地,酸枣灌丛,荆条灌丛,乔木林地,以裸地为对照,每种植被类型各选择 3 个 20 m×20 m 标准样地,共设置 15 个样地,各样地基本情况见表 1。

表 1 样地基本情况

样地	海拔/m	土层厚度/cm	林龄/a	平均树高/m	平均胸径/cm	郁闭度/盖度	优势物种
CK	378	15	—	—	—	—	—
CD	355	20	—	—	—	0.8	荩草,野艾蒿
SZ	352	20	—	1.5	—	0.7	酸枣,荩草
JT	350	20	—	2.3	—	0.9	荆条,荩草
CB	398	40	30	7.2	10.3	0.8	侧柏,胡枝子

注:CK,CD,SZ,JT,CB 分别表示裸地、草地、酸枣样地、荆条样地和侧柏样地,文中下同。

2.2 样品采集及分析

2015 年 7 月,在每个样地中选择具有代表性的样点,清理地表凋落物后,随机挖掘 3 个土壤剖面,用环刀(直径 50.46 mm×高 50 mm)分两层(0—10 cm,10—20 cm)取原状土样,每个剖面取 2 组土样,1 组用于测定土壤入渗性能,1 组用于测定土壤容重等物理性质;同时,采用 S 形布点分两层采集土壤混合样品用于化学性质测定;在每个样地中选择位于 4 株林木的对角地带的代表样点 3 个,去除地表凋落物,采用大环刀(直径 750 mm×高 100 mm)分层挖取含

根系的土壤样柱,筛分后测定根系结构指标。

土壤渗透特性(初始入渗速率、稳定入渗速率、前 30 min 累计入渗量)的测定采用双环入渗法<sup>[11,17]</sup>;土壤容重、毛管孔隙度、非毛管孔隙度和总孔隙度采用环刀法测定;土壤有机质质量分数采用重铬酸钾外加热法测定。土壤样柱中的根系经筛分清洗后,采用 WINRHIZO 根系分析系统测定根体积密度、根表面积密度等指标,再将根系于 70℃ 恒温下烘干 48 h 后称重测定生物量。不同植被类型各土层土壤理化性质及根系结构指标见表 2。

2.3 土壤入渗模型

建立土壤入渗模型是研究土壤入渗的有效方法,有关土壤入渗模型有多种,结合研究实际,选取以下 3 个模型对不同植被类型土壤入渗特征进行模拟。

(1) Kostiakov 入渗模型

$$f(t)=at^{-b}$$

式中: $f(t)$ 为土壤入渗速率(mm/min); $t$ 为入渗时间(min); $a, b$ 为拟合参数。

(2) Philip 入渗模型

$$f(t)=1/2St^{-1/2}+A$$

表 2 不同植被类型土壤理化性质及根系结构指标

样地	土层/cm	容重/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	毛管 孔隙度/%	非毛管 孔隙度/%	总孔 隙度/%	有机质/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	根质量密度/ ( $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	根长密度/ ( $\text{mm}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	根表面积密度/ ( $\text{mm}^2\cdot\text{cm}^{-3}$ )	根体积密度/ ( $\text{mm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ )	根平均 直径/mm
CK	0—10	1.47±0.12ab	36.42±2.69ab	3.27±0.27b	39.69±0.59b	6.92±0.79f	—	—	—	—	—
	10—15	1.49±0.12a	27.39±0.80b	9.43±1.86a	36.82±1.06b	6.21±0.19f	—	—	—	—	—
CD	0—10	1.48±0.10a	43.21±0.58ab	2.53±0.81b	45.74±1.31ab	9.49±0.53e	4.62±1.54ab	4.13±0.74b	0.66±0.11ab	8.60±0.40a	0.50±0.07b
	10—20	1.59±0.29a	42.02±8.55ab	3.85±0.49b	45.87±1.01ab	8.37±0.19ef	1.51±0.20c	1.68±0.13c	0.11±0.02c	2.07±0.13b	0.15±0.03c
SZ	0—10	1.43±0.06ab	44.50±5.35a	2.37±0.17b	46.87±3.43ab	13.86±0.37cd	4.89±1.15ab	3.36±0.51b	0.57±0.14ad	7.77±1.58ac	0.55±0.07a
	10—20	1.55±0.29a	35.93±7.00ab	5.37±0.10ab	41.30±1.97b	12.11±0.30d	2.17±0.33cd	1.85±0.16c	0.24±0.03b	3.18±0.31b	0.21±0.02c
JT	0—10	1.22±0.04b	48.27±5.51a	3.14±0.81b	51.41±2.58a	14.70±0.82c	6.22±1.08a	6.26±1.04a	0.81±0.07a	8.93±1.80a	0.54±0.05ab
	10—20	1.33±0.08b	40.29±3.23ab	5.79±0.74ab	46.08±1.65ab	12.28±0.71d	3.02±0.15bc	3.20±0.50b	0.36±0.04cd	3.26±0.28b	0.25±0.04c
CB	0—10	1.25±0.01b	46.11±2.09a	5.77±1.76ab	51.88±0.52a	30.64±2.27a	4.73±0.80ab	2.90±0.66bc	0.47±0.03bd	6.93±0.24ac	0.71±0.15a
	10—20	1.40±0.10ab	39.79±3.53ab	6.34±1.07ab	46.13±0.88ab	19.31±1.88b	3.97±0.91abd	1.22±0.16c	0.26±0.06cd	4.36±0.64bc	0.66±0.09ab

注:同列不同字母表示差异达到显著水平( $p<0.05$ )。

3 结果与分析

3.1 不同植被类型土壤入渗特征

3.1.1 土壤入渗特征 土壤渗透性对地表径流量的大小和速率具有直接调控作用,同时也对土壤侵蚀和化学物质运转等过程产生重要影响,是土壤水文生态功能的重要体现,也是土壤抗侵蚀能力的度量标准<sup>[18-19]</sup>。不同植被类型各土层初渗速率(前 6 min)、稳渗速率和前 30 min 渗透量见表 3,各植被类型不同时刻渗透速率见图 1。

表 3 不同植被类型土壤的渗透特性

样地	土层/cm	初渗速率/ ( $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ )	稳渗速率/ ( $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ )	前 30 min 入渗量/mm
CK	0—10	0.17±0.09c	0.13±0.10c	4.20±0.13d
	10—15	0.16±0.07c	0.12±0.08c	3.91±0.11d
CD	0—10	0.63±0.13bc	0.54±0.22bc	16.81±2.53cd
	10—20	0.51±0.16bc	0.46±0.11bc	14.23±4.72cd
SZ	0—10	0.94±0.30b	0.91±0.08b	27.55±4.45c
	10—20	0.50±0.23bc	0.45±0.03bc	13.80±1.25cd
JT	0—10	0.95±0.13b	0.84±0.17bc	26.70±5.01c
	10—20	0.80±0.31b	0.71±0.15bc	22.18±3.28cd
CB	0—10	5.96±0.49a	4.76±0.31a	159.00±10.66a
	10—20	3.05±0.12a	2.91±0.10a	88.28±5.28b

注:同列不同字母表示差异达到显著水平( $p<0.05$ )。

式中: $A$ 为稳定入渗速率(mm/min); $S$ 为土壤吸水率。

(3) Horton 入渗模型

$$f(t)=f_c+(f_0-f_c)e^{-kt}$$

式中: $f_c, f_0, k$ 分别表示稳定入渗率、初始入渗率、常数。

2.4 数据处理

采用单因素方差分析(one-way ANOVA)检验不同植被类型土壤性质是否有显著差异( $\alpha=0.05$ )。当差异性显著时,采取 Turkey 距离进行多重比较。单因素方差分析和典型相关分析均通过 SPSS 19.0 软件实现;采用 Microsoft Excel 进行图表绘制。

由表 3,图 1 可以看出,不同植被类型土壤渗透速率具有相同的变化趋势,初期渗透速率较高,随着入渗时间的推移渗透速率逐渐下降,最终达到稳渗状态,土壤初渗速率和稳渗速率最大值均出现在侧柏样地,分别为 5.96 mm/min,4.76 mm/min。各植被类型土壤 0—10 cm 层土壤渗透速率大于 10—20 cm 层土壤渗透速率。不同植被类型的土壤初渗速率、稳渗速率和前 30 min 入渗量均有较大差异。不同土层土壤的初渗速率在不同植被类型中均呈现侧柏>荆条>酸枣>草地>裸地的趋势,表明植被恢复可改良土壤的入渗性能。除了酸枣样地 0—10 cm 层土壤稳渗速率大于荆条样地土壤稳渗速率外,其他样地土壤稳渗速率表现出与土壤初渗速率相同的趋势。然而,酸枣样地 10—20 cm 层土壤的稳渗速率却小于荆条样地,这可能是由于灌草植被只改善了表层土壤的渗透条件,而对于较深层次的土壤改良作用没有灌丛植被明显。

3.1.2 土壤入渗过程拟合 土壤水分入渗是一个十分复杂的水文过程,土壤入渗过程模拟是研究这一物理过程的重要途径。对不同植被类型、不同土层土壤的渗透数据依照选定入渗模型进行过程模拟,得到结果见表 4。由表 4 可知,Philip 入渗模型的  $R^2$  值(0.830)最大,表明模型拟合值与本研究相应实测值

之间的拟合程度较高,对不同植被类型土壤入渗过程拟合效果最好,Kostiakov 入渗模型拟合效果次之,

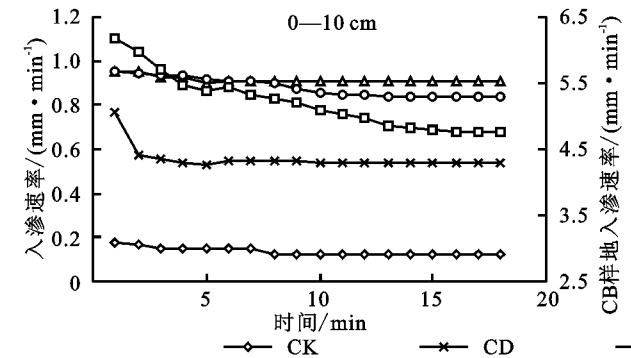


图 1 不同植被类型土壤渗透过程曲线

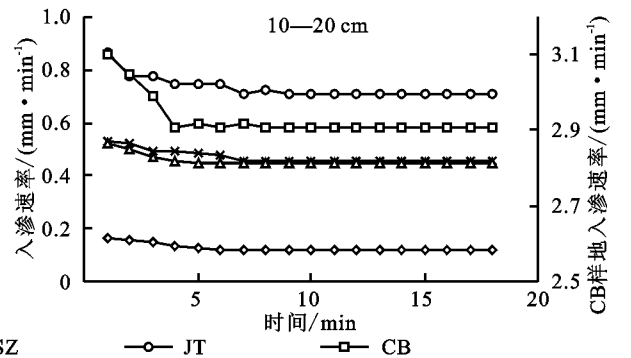
表 4 不同植被类型土壤入渗模式拟合结果

样地	土层/cm	Kostiakov 入渗模型			Philip 入渗模型			Horton 入渗模型			
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>S</i>	<i>A</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>f</i> <sub>c</sub>	<i>f</i> <sub>0</sub>	<i>k</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>
CK	0—10	0.181	0.139	0.869	0.226	0.106	0.837	0.166	0.125	0.084	0.629
	10—15	0.159	0.106	0.823	0.179	0.104	0.901	0.156	0.123	2.627	0.598
CD	0—10	0.643	0.073	0.501	0.629	0.469	0.683	0.632	0.542	0.397	0.730
	10—20	0.488	0.028	0.705	0.316	0.427	0.891	0.514	0.458	0.475	0.642
SZ	0—10	0.914	0.001	0.726	0.159	0.895	0.732	0.942	0.913	0.182	0.458
	10—20	0.461	0.011	0.597	0.274	0.420	0.878	0.498	0.450	0.323	0.569
JT	0—10	0.964	0.052	0.893	0.545	0.805	0.744	0.947	0.838	0.195	0.591
	10—20	0.769	0.032	0.834	0.543	0.659	0.943	0.804	0.713	0.208	0.797
CB	0—10	6.084	0.085	0.958	5.817	4.594	0.898	5.956	4.758	0.298	0.618
	10—20	3.006	0.014	0.558	0.742	2.833	0.792	3.047	2.908	0.446	0.440

Kostiakov 入渗模型中的参数 *a* 代表一个时间段内平均入渗速率,*b* 值的大小则反映土壤入渗速率递减状况,其值越大,表明入渗速率随时间递减的越快<sup>[20]</sup>。表 4 中,参数 *a* 的值在不同植被类型中,均表现出 0—10 cm 层大于 10—20 cm 层;同时,同一土层中,参数 *a* 变化规律与前文中不同植被类型土壤入渗特性相吻合。不同土层参数 *b* 最大值均出现在裸地,说明裸地土壤入渗速率随时间减少最快。

Philip 入渗模型中的参数 *S* 是表征土壤入渗性能的有效指标,其值越大,则反映出的土壤入渗速率越大。表 4 中,除酸枣样地外,其他样地 0—10 cm 层土壤入渗能力均大于 10—20 cm 层,与实际测定得到的土壤入渗性能一致,也表明 Philip 入渗模型在本研

Horton 入渗模型拟合效果最差,不适合用于描述该区域土壤入渗特征。



究中具有较高的适配性。不同植被类型中,侧柏林地的土壤入渗能力最强,2 个土层的 *S* 值均为最大,分别为 5.817,0.742。

3.2 土壤入渗性能影响因素

3.2.1 土壤入渗性能影响因素相关分析 为探讨土壤入渗性能与土壤理化性质、根系结构之间的相关关系,研究选取土壤理化性质指标:土壤容重(*X*<sub>1</sub>)、毛管孔隙度(*X*<sub>2</sub>)、非毛管孔隙度(*X*<sub>3</sub>)、总孔隙度(*X*<sub>4</sub>)、有机质质量分数(*X*<sub>5</sub>),根系结构指标:根质量密度(*X*<sub>6</sub>)、根长密度(*X*<sub>7</sub>)、根表面积密度(*X*<sub>8</sub>)、根体积密度(*X*<sub>9</sub>)、根平均直径(*X*<sub>10</sub>),表征土壤入渗性能指标:初渗速率(*X*<sub>11</sub>)、稳渗速率(*X*<sub>12</sub>)和前 30 min 入渗量(*X*<sub>13</sub>)进行相关分析,结果详见表 5。

表 5 土壤入渗性能与土壤理化性质、根系结构相关系数

指标	<i>X</i> <sub>1</sub>	<i>X</i> <sub>2</sub>	<i>X</i> <sub>3</sub>	<i>X</i> <sub>4</sub>	<i>X</i> <sub>5</sub>	<i>X</i> <sub>6</sub>	<i>X</i> <sub>7</sub>	<i>X</i> <sub>8</sub>	<i>X</i> <sub>9</sub>	<i>X</i> <sub>10</sub>
<i>X</i> <sub>11</sub>	-0.387**	0.281	0.251	0.423**	0.753**	0.329*	0.089	0.190	0.314*	0.460**
<i>X</i> <sub>12</sub>	-0.371*	0.294	0.228	0.412**	0.733**	0.312*	0.011	0.128	0.309*	0.494**
<i>X</i> <sub>13</sub>	-0.381**	0.293	0.243	0.422**	0.748**	0.320*	0.048	0.158	0.296*	0.480**

注: \*\* 表示在 *p*<0.01 水平上显著相关,\* 表示在 *p*<0.05 水平上显著相关。

由表 5 可知,除理化性质指标中土壤毛管孔隙度、非毛管孔隙度以及根系结构中根长密度、根表面积密度外,其余指标均与土壤初渗速率、稳渗速率和前 30 min 入渗量存在显著(*p*<0.05)或极显著(*p*<0.01)的的相关关系。土壤容重、总孔隙度是土壤疏

松程度的重要度量,土壤容重越小,总孔隙度越大,土壤就越松散,渗透性能越强,这可能就是土壤容重与 3 个土壤渗透性能指标存在负相关关系而土壤孔隙度与渗透性能存在正相关关系的原因。土壤有机质质量分数与表征土壤入渗性能的三个指标间均存在

极显著( $p<0.01$ )的正相关关系,土壤有机质质量分数越高,则相应土壤的入渗性能就越好,这与大多数的研究结果相一致<sup>[21-22]</sup>。土壤有机质并不会直接影响土壤入渗性能,主要是靠土壤有机质改变土壤团聚体、促进孔隙度的形成来间接发挥效用的<sup>[23]</sup>。

根系结构指标中根质量密度、根体积密度和根平均直径均与土壤入渗性能存在显著( $p<0.05$ )或极显著( $p<0.01$ )的相关关系。植物根系与地上组织在地表连接处形成微型挡土栅可以阻止土壤颗粒搬运,同时受阻沉积的土壤在地表形成微型滤水土体<sup>[24]</sup>,能有效增加地表径流入渗,直接增强土壤渗透性能;另外,由于根系的穿插、网络及固结作用,能将土壤单粒粘结起来,改善了土壤的团粒结构和孔隙

性<sup>[25]</sup>,间接提高土壤入渗速率。

3.2.2 土壤入渗性能及其影响因素的典型相关分析 从土壤入渗性能与土壤理化性质、根系结构之间的相关分析中,仅仅得到土壤入渗性能与土壤理化性质、根系结构中的某些指标之间存在相关关系,缺乏详尽的定量描述。因此,本研究采用典型相关分析方法对土壤入渗性能与土壤理化性质和根系结构之间的定量关系进行探讨,结果详见表6。

从表6可知,3个典型变量组的典型相关系数分别为0.872,0.981,0.922,卡方检验表明,土壤理化性质与根系结构两者的典型相关关系显著( $p<0.05$ ),而土壤渗透特征与土壤理化性质和根系结构之间的典型相关关系呈极显著水平( $p<0.01$ )。

表6 土壤理化性质、根系结构、土壤渗透性能典型相关分析结果

典型相关及变量	变量组负荷系数	典型相关系数	卡方值	自由度	p 值
土壤理化性质 $U_1$ 与 根系结构 $V_1$	$U_1 = 0.366X_6 - 0.087X_7 + 2.327X_8 - 2.644X_9 + 0.991X_{10}$ $V_1 = -1.790X_1 - 1.084X_2 - 0.770X_3 - 0.647X_4 + 0.396X_5$	0.872	41.748	25	0.019
土壤理化性质 $U_2$ 与 土壤渗透特征 $V_2$	$U_2 = 4.373X_{11} + 5.439X_{12} - 10.737X_{13}$ $V_2 = -0.415X_1 + 0.468X_2 + 1.078X_3 - 1.299X_4 - 0.996X_5$	0.981	63.331	15	0.000
土壤渗透特征 $U_3$ 与 根系结构 $V_3$	$U_3 = -0.037X_6 + 0.125X_7 + 0.384X_8 + 0.269X_9 - 1.084X_{10}$ $V_3 = -4.451X_{11} - 9.404X_{12} + 12.918X_{13}$	0.922	39.531	15	0.001

从土壤理化性质与根系结构典型相关变量负荷系数可知,对土壤理化性质产生影响作用最大的根系结构指标为根体积密度,负荷系数绝对值为2.644;对根系结构影响最大的土壤理化性质指标为土壤容重,负荷系数绝对值为1.790。土壤理化性质与土壤渗透性能之间的典型相关变量负荷系数结果表明,土壤理化性质指标对土壤渗透特性影响作用大小依次为总孔隙度(1.299)>非毛管孔隙度(1.078)>有机质质量分数(0.996)>毛管孔隙度(0.468)>土壤容重(0.415),而对土壤理化性质影响作用最大的是前30 min入渗量(10.737);根系结构指标与土壤渗透性能的典型相关关系反映出,根系结构指标对土壤渗透特性影响作用呈现出根平均直径(1.084)>根表面积密度(0.384)>根体积密度(0.269)>根长密度(0.125)>根质量密度(0.037)的趋势,土壤渗透性能指标中前30 min入渗量(12.918)和稳渗速率(9.404)则对根系结构指标产生重要影响。

## 4 结论

(1) 不同植被类型土壤渗透性能存在较大差异。相较于裸地,不同植被类型下土壤入渗性能均得到了不同程度提高。植被恢复过程中,乔灌植被的土壤入渗性能最好,土壤初渗速率和稳渗速率最大值分别为5.96 mm/min和4.76 mm/min。各植被类型中,土壤0—10 cm层土壤渗透速率均大于10—20 cm层土壤渗透速率。土壤入渗模型拟合结果表明 Philip 入渗模型对不同植

被类型土壤入渗过程拟合效果最好,Kostiakov 入渗模型拟合效果次之,Horton 入渗模型拟合效果最差,不适合用于描述该区域土壤入渗特征。

(2) 表征土壤入渗性能的三个指标均与根质量密度、根体积密度存在显著的正相关关系( $p<0.05$ ),与土壤总孔隙度、有机质质量分数和根平均直径存在极显著正相关关系( $p<0.01$ )。土壤容重与稳渗速率之间存在显著负相关关系( $p<0.05$ ),与初渗速率和前30 min入渗量呈极显著负相关关系( $p<0.01$ )。

(3) 土壤入渗性能、土壤理化性质、根系结构三者典型相关分析表明对土壤渗透能力影响最大的土壤理化性质、根系结构指标分别是总孔隙度、根平均直径,变量组负荷系数值分别为1.299,1.084。

### 参考文献:

- [1] Jimenez C C, Tejedor M, Morillas G, et al. Infiltration rate in andisols: Effect of changes in vegetation cover (Tenerife Spain)[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 61(3): 153-158.
- [2] 王新平, 李新荣, 康尔泗, 等. 腾格里沙漠东南缘人工植被区降水入渗与再分配规律研究[J]. 生态学报, 2003, 23(6): 1234-1241.
- [3] 余新晓, 赵玉涛, 张志强, 等. 长江上游亚高山暗针叶林土壤水分入渗特征研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(1): 15-19.
- [4] 张淑兰, 张海军, 张武, 等. 小兴安岭南麓典型森林类型的土壤水文功能研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(1): 140-145.

- [5] 赵洋毅,王玉杰,王云琦,等. 渝北水源区水源涵养林构建模式对土壤渗透性的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(15): 4162-4172.
- [6] 韩路,王海珍,于军. 塔里木河上游不同植被类型土壤水文特性研究[J]. 水土保持学报, 2013, 27(6): 124-129.
- [7] 巍强,张秋良,代海燕,等. 大青山不同林地类型土壤入渗特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 111-115.
- [8] 李建兴,何丙辉,梅雪梅,等. 紫色土区坡耕地不同种植模式对土壤渗透性的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(3): 725-731.
- [9] 杨永辉,赵世伟,雷廷武,等. 宁南黄土丘陵区不同植被下土壤入渗性能[J]. 应用生态学报, 2008, 19(5): 1040-1045.
- [10] 吕刚,顾宇书,魏忠平,等. 白石砬子自然保护区几种主要植被类型土壤入渗特性研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(5): 780-786.
- [11] 赵阳,余新晓,吴海龙,等. 华北土石山区典型森林枯落物层和土壤层水文效应[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 148-152.
- [12] Machiwa L D, Jha M K, Mal B C. Modeling infiltration and quantifying spatial soil variability in a wasteland of Kharagpur India[J]. Biosystems Engineering, 2006, 95(4): 569-582.
- [13] 柴亚凡,王恩姮,陈祥伟,等. 植被恢复模式对黑土贮水性能及水分入渗特征的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1): 60-64, 73.
- [14] 赵西宁,吴发启. 土壤水分入渗的研究进展和评述[J]. 西北林学院学报, 2004, 19(1): 42-45.
- [15] 吕刚,吴祥云. 土壤入渗特性影响因素研究综述[J]. 中国农学通报, 2008, 24(7): 494-499.
- [16] 王意锟,金爱武,方升佐,等. 浙西南不同经营强度下毛竹林土壤渗透性研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(2): 41-46.
- [17] 徐敬华,王国梁,陈云明,等. 黄土丘陵区退耕地土壤水分入渗特征及影响因素[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(2): 19-25.
- [18] Rachman A, Anderson S H, Gantzer C J, et al. Influence of stiff-stemmed grass hedge systems on infiltration [J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(6): 2000-2006.
- [19] 许景伟,李传荣,夏江宝,等. 黄河三角洲滩地不同林分类型的土壤水文特征[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1): 173-176.
- [20] 刘芝芹,郎南军,彭明俊,等. 金沙江流域典型森林土壤水分入渗特征试验研究[J]. 水土保持通报, 2014, 34(2): 43-47.
- [21] 林代杰,郑子成,张锡洲,等. 不同土地利用方式下土壤入渗特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 33-36.
- [22] 侯秀丽,付登高,阎凯,等. 滇中不同植被恢复策略下土壤入渗性能及其影响因素[J]. 山地学报, 2013, 31(3): 273-279.
- [23] 张治伟,朱章雄,王燕,等. 岩溶坡地不同利用类型土壤入渗性能及其影响因素[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 71-76.
- [24] 李建兴,何丙辉,湛芸. 不同护坡草本植物的根系特征及对土壤渗透性的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1535-1544.
- [25] Czames S, Hallett P D, Bengough A G, et al. Root and microbial-derived mucilage's affect soil structure and water transport[J]. European Journal of soil Science, 2000, 51(3): 435-443.

(上接第59页)

- [4] Woodwell G M, Whittaker R H, Reiners W A, et al. The biota and the world carbon budget[J]. Science, 1978, 199(4325): 141-146.
- [5] 刘华,雷瑞德. 我国森林生态系统碳储量和碳平衡的研究方法及进展[J]. 西北植物学报, 2005, 25(4): 835-843.
- [6] 王效科,白艳莹,欧阳志云,等. 全球碳循环中的失汇及其形成原因[J]. 生态学报, 2002, 22(1): 94-103.
- [7] 康惠宁,马钦彦. 中国森林C汇功能基本估计[J]. 应用生态学报, 1996, 7(3): 230-234.
- [8] 周广胜,王玉辉,蒋延玲,等. 陆地生态系统类型转变与碳循环[J]. 植物生态学报, 2002, 26(2): 250-254.
- [9] 朱志诚. 陕北黄土高原森林区植被恢复演替[J]. 西北林学院学报, 1993, 8(1): 87-94.
- [10] 张长庆,张文辉. 黄土高原不同立地条件下刺槐人工林种群的无性繁殖与更新[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2009, 37(1): 135-144.
- [11] 张柏林,陈存根. 长武县红星林场刺槐人工林的生物量和生产量[J]. 陕西林业科技, 1992(3): 13-17.
- [12] 张柏林. 子午岭地区辽东栎林生物生产量的研究[J]. 西北林学院学报, 1990, 5(1): 1-7.
- [13] 王绍强,周成虎,罗承文. 中国陆地自然植被碳量空间分布特征探讨[J]. 地理科学进展, 1999, 18(3): 238-244.
- [14] 黄松殿,吴庆标,廖克波,等. 观光木人工林生态系统碳储量及其分布格局[J]. 生态学杂志, 2011, 30(11): 2400-2404.
- [15] 周玉荣,于振良,赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡[J]. 植物生态学报, 2000, 24(5): 518-522.
- [16] 王效科,冯宗炜. 中国森林生态系统中植物固定大气碳的潜力[J]. 生态学杂志, 2000, 19(4): 72-74.
- [17] 李意德,方精云. 尖峰岭热带山地雨林群落生产和二氧化碳同化净增量的初步研究[J]. 植物生态学报, 1998, 22(2): 127-134.