

土壤渗透性的区域变化规律及因子分析

丁海晶, 姜姜, 张金池

(南方现代林业协同创新中心, 南京林业大学水土保持与生态修复重点实验室, 南京 210037)

摘要: 通过应用数据挖掘和数据整合方法, 以建立我国土壤渗透性数据库, 并对影响土壤渗透性的各因子综合分析, 揭示土壤渗透性的区域变化规律。结果表明: (1) 土壤渗透性呈现明显的区域性变化, 表现为西南地区 < 华北地区 < 东北地区。西南地区土壤渗透力最差, 稳渗速率对数值为 $-0.5 \sim -2.0$; 华北、东北地区整体数值均在 0.5 以上, 土壤渗透力较强。(2) 在影响土壤渗透力的各因子中, 气候类型及林龄通过影响植被来间接改善土壤渗透力; 植被能有效提升土壤渗透力, 但不同植被类型间土壤渗透力并无显著差异; 随土层深度的增加, 土壤渗透力有所下降。土壤有机质、土壤容重及非毛管孔隙度对土壤渗透力的影响均存在一个阈值, 其值分别为 30%, 1.0 g/cm^3 , 30%。当各因子值超过此阈值, 其对土壤渗透力的影响减弱。为更好地探究土壤类型对土壤渗透力的影响作用, 在今后的研究中应加强对土壤结构、团聚体等数据的分析。(3) 海拔、土层深度及土壤容重对土壤渗透力的影响主要通过影响土壤中非毛管孔隙数量来起作用的。非毛管孔隙度是影响土壤渗透力的主导因子, 通径系数为 0.34。

关键词: 土壤入渗; 影响因素; 结构方程模型

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)01-0051-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.01.009

Regional Variation and Factor Analysis of Soil Permeability

DING Haijing, JIANG Jiang, ZHANG Jinchi

(Southern Center for Collaborative Innovation in Modern Forestry, Jiangsu Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Ecological Restoration, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037)

Abstract: In this study, data mining and integration were used to establish China's soil permeability database, and comprehensive analysis of the influencing factors were applied to reveal the regional variation of soil permeability. The results showed that: (1) The changes in soil permeability were regional in Southwest China < North China < Northeast China. Southwestern China had the worst soil permeability, and the logarithm of infiltration rate fluctuated between $-0.5 \sim -2.0$. The soil permeability in North and Northeast of China was good, with values above 0.5. (2) Climate types and forest ages indirectly improved soil penetration by affecting vegetation. Vegetation could effectively increase soil infiltration, but there was no significant difference between vegetation types. As soil layers deepened, soil permeability declined. The threshold values existed for all the effects of soil organic matter, soil bulk density and non-capillary porosity on soil infiltration. The values were 30%, 1.0 g/cm^3 , and 30%, respectively. When the value of each factor exceeded this threshold, its effect on soil penetration decreased. In order to better explore the effect of soil types on soil permeability, the analysis of soil structure, aggregates and other data should be strengthened in the future research. (3) The effects of altitude, soil depth and soil bulk density on soil permeability occurred mainly through affecting the number of non-capillary pores in the soil. Non-capillary porosity was the dominant factor affecting soil infiltration, with the path coefficient of 0.34.

Keywords: soil permeability; influencing factor; sem

土壤水是重要的生态水源和水文要素之一, 是四水(地表水、地下水、大气水、土壤水)转化的纽带, 在

水资源的形成、转换与消耗过程中占有重要的地位^[1-3]。土壤入渗是水分渗入土壤的过程, 是土壤水

收稿日期: 2018-07-20

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0505500, 2017YFC0505502); 国家自然科学基金项目(41701225); 江苏省自然科学基金项目(BK20170920); 江苏高校品牌专业建设工程项目(PPZY2015A062)

第一作者: 丁海晶(1993-), 女, 硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: dhj93mail@163.com

通信作者: 姜姜(1982-), 男, 博士, 教授, 主要从事森林水文研究。E-mail: ecologyjiang@gmail.com

分循环的重要环节^[4]。土壤水分的来源、运动、保持和贮存等都取决于土壤入渗,作物根系吸收利用的水分也来源于渗入土壤的水分^[5]。入渗过程是一个复杂的动态过程,研究其变化规律及其影响因子,能更好地调节地表径流机制,对预防治理土壤流失具有重大意义。土壤入渗过程是一个复杂的动态过程,渗透性的优劣不仅受土壤本身物理化学性质的影响,还受制于许多外在因素的限制^[6]。徐昕等^[7]运用 PCA 的方法综合比较了针阔混交林、竹林、常绿阔叶林、针叶纯林、针叶混交林 5 种林分土壤水分—物理性质以及土壤物化性质发现,相较于其他 4 种林分,针阔混交林土壤总孔隙度较高,具有更为丰富的非毛管孔隙,使得针阔混交林的土壤养分更高,且渗透性能以及持水能力最强。但喻明美等^[8]在对广州白云山天然和人工阔叶林分、阔叶混交林、针叶林及灌丛草地 5 种林分林下土壤初渗、稳渗及平均速率 3 个渗透指标进行 ANOVA 分析后发现,发现不同林分类型下土壤渗透性能并未有显著性差异。相对于纯林群落,一定比例的混交林能在一定程度上提高林地渗透力,原因是由于混交林群落生物多样性高,枯落物现存量高,植被成长良好,提高了土壤层的渗透性能^[9]。土壤孔隙主要包括毛管孔隙和非毛管孔隙,毛管孔隙使水分长久留在土壤中,供植物吸收和蒸发;非毛管孔隙能帮助降水及时下渗,决定了森林的蓄水能力,影响土壤的通透性^[10]。有研究^[11]发现,武功山山地草甸土壤渗透性在不同海拔高度总体表现为在 1 600~1 800 m 海拔梯度内,随着海拔升高土壤渗透力呈下降趋势,而在高海拔梯度(1 900 m)处渗透性又呈现上升趋势,造成这种现象是由于随海拔增高植被长势矮化,根系浅;而在高海拔处,植被为抵抗风力,根系更为丰富,能有效改善土壤结构,有利于增强土壤渗透性能。

目前对土壤渗透性的研究主要集中在站点尺度上围绕土壤因子和植被因子研究不同植被类型、不同海拔、不同林龄、不同土层等因子对土壤渗透能力的影响。影响土壤渗透过程的众多因子往往相互作用导致土壤渗透性呈现出复杂变化,但以往的研究很少关注各因子对土壤渗透性的贡献率。本文拟通过数据挖掘技术和数据整合技术,对影响土壤渗透性的各因子综合分析,揭示土壤渗透性的空间变化规律、各因子对土壤渗透性的影响规律及权重。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区域与数据来源

通过中国学术期刊数据库(中国知网)的初步搜索并下载有关土壤渗透性的文献,文献下载搜索关键词为土壤渗透、森林水源涵养和土壤水分。对下载的文章初步阅读后,进行更进一步的筛选,主要筛选依

据:试验地在野外天然林或人工林实施;需要同时包含土壤类型、林分类型、气候类型及土壤理化性质数据;排除对土壤渗透性改良的化学方法研究;排除对土壤渗透性测量方法进行评价的文章。经初步筛选后,得到符合条件的文章共 141 篇。

对文章中相关数据进行提取,构建数据库选取的因子为地理坐标、年降水量、年均气温、林龄、土壤类型、林分类型、土层深度、土壤有机质、土壤容重、土壤总孔隙度、非毛管孔隙度、毛管孔隙度以及试验方法,以稳渗速率做为描述土壤渗透力的关键指标。为消除异方差,本文所用稳渗速率数据均为室内环刀法所测。数据库存储方式为 Excel 表格,最终收集数据共 1 622 条。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤渗透性与各潜在影响因子之间的相关性

通过数据整合得到的稳渗速率数据变异较大,为消除异方差、使数据符合正态分布,将稳渗速率取以 10 为底的对数值作为衡量土壤渗透性能的指标。对各自变量数据进行分组聚合标准化,同时相对应的稳渗速率取平均值,以散点图的形式呈现各因子对土壤渗透性的影响关系。同时为探究不同气候类型、植被类型、土壤类型、土层深度 4 个条件下土壤渗透性的差异,在 R 软件中进行了双因素方差分析(ANOVA),并采用 LSD,最小显著性差异法进行检验。

1.2.2 土壤渗透性影响因子分析 结构方程模型(Structural Equation Modeling, SEM)是一种新兴的统计分析方法,可以描述多个自变量,多用于研究多个自变量对应变量所造成的直接或者间接影响^[12],所以又被称为协方差结构模型。结构方程模型的全部过程可以分为个 4 阶段模型设定、模型拟合、模型评价、模型修正,如果模型无法拟合或拟合效果不理想,则需要根据评估结果对模型进行修正。模型修正就是在不断调整的过程中,以得到最合理、解释力最强、对样本数据拟合良好的最终模型。基于本研究整合建立的数据库以及结合影响因素的信度、效度检验,最终选取海拔、纬度、土层深度、土壤容重、非毛管孔隙度作为影响土壤渗透性的主要因子,来构建影响土壤渗透性的结构方程模型。

运用 Excel 2007、SPSS、GetData Graph Digitizer、AMOS 及 R 软件进行数据处理、统计分析以及图表、结构方程模型的绘制。

2 结果与分析

2.1 土壤渗透性的空间变化规律

2.1.1 全国土壤渗透性空间变化情况 探究森林系统全国尺度上土壤水分入渗的影响因子不仅有利于发挥各地森林水源涵养功能,更有利于加强森林保水保土能力。由图 1 可知,数据点分布具有明显的空间

性,对土壤水分渗透过程的研究主要集中于我国华南、华东及华北地区,而缺少对西北地区土壤水分渗透规律的研究。全国土壤稳渗速率对数值变化范围为 $-2.11\sim 2.10$,波动范围较大,表明各地土壤渗透性的优劣差异较大。经过进一步探究不同区域土壤渗透力的变化情况发现,全国土壤渗透性能从西南到华北、东北方向呈现上升的趋势。西南区土壤渗透力最差,稳渗速率对数值集中分布在 $-0.5\sim -2.0$,表现出较差的渗透性能;而华北、东北地区整体土壤渗透性能较好,均在 0.5 以上,表现出最优的土壤渗透力。

2.1.2 土壤渗透性在经、纬度上的分布特征 经度的变化在一定程度上影响着土壤渗透力的变化,但变化不显著,关系表达式为 $y=0.001x^2-0.2144x+11.977$, $R^2=0.315$ 。式中: y 为稳渗速率对数值(mm/min); x 为经度($^\circ$)。从图 2 可以看出,除去低纬度的一个异常点后,随着纬度的增加,土壤渗透性有微弱的提高的趋势,

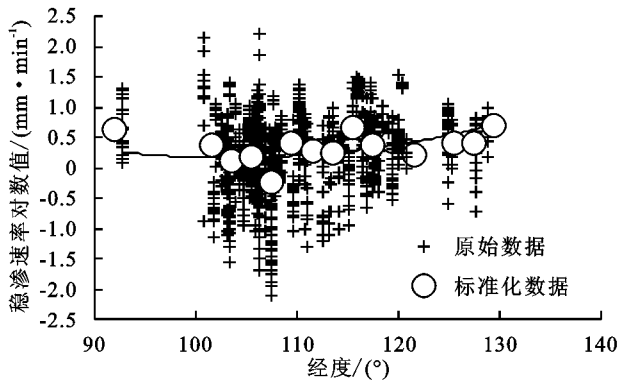


图 2 土壤渗透性在经纬度上的分布特征

2.1.3 土壤渗透性沿海拔梯度分布特征 由图 3 可知,整体看来,在全国尺度上,土壤渗透性随海拔的升高而增加,两者之间存在显著的正相关性($P=0.01$),关系表达式为: $y=0.0001x+0.1384$, $R^2=0.4895$ 。式中: y 为稳渗速率对数值(mm/min); x 为海拔(m)。海拔是影响土壤渗透性的关键因子之一。

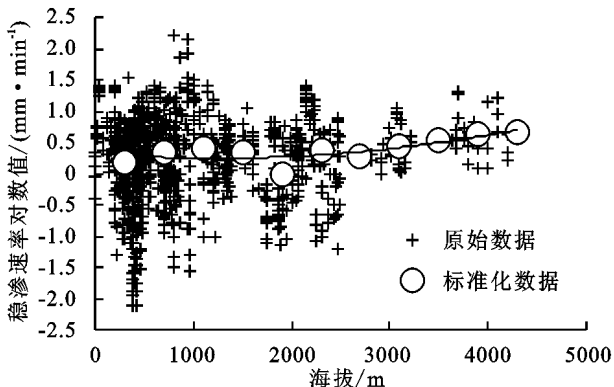


图 3 海拔与土壤渗透性的相关性

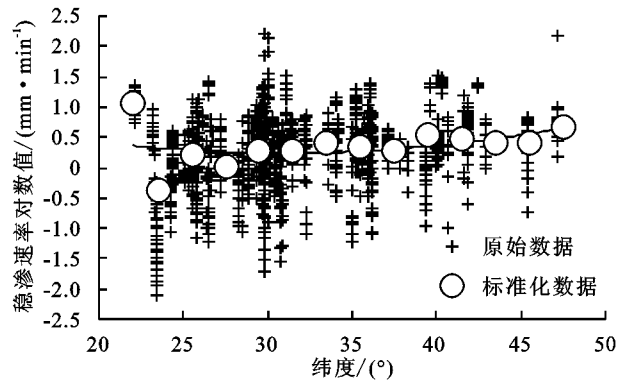
2.2 土壤渗透性与各潜在影响因子之间的相关性

2.2.1 气候类型对土壤渗透性的影响 在全国尺度上,研究区域共涉及 4 种气候类型:A 为亚热带季风气

关系表达式为: $y=0.007x^2-0.009x+0.55$, $R^2=0.21$ 。式中: y 为稳渗速率对数值(mm/min); x 为纬度($^\circ$)。说明纬度的变化同样也影响着土壤渗透力的变化,但影响并不显著。但进一步数据进行趋势检验(MK 分析)发现,随纬度增加,稳渗速率变化趋势明显, P 值为 0.04 。这与之前全国尺度上,土壤渗透性变化趋势一致。



图 1 全国土壤渗透性空间变化情况



候,B 为高原山地气候,C 为温带大陆性气候,D 为温带季风气候。由图 4 可知,不同气候类型土壤性能优劣排序为: $A<C<D<B$ 。经 LSD 检验发现,除亚热带季风气候类型与其他 3 种气候类型下的土壤渗透性能之间存在显著差异,但其他气候类型之间并无显著差异。研究区域内,数据点在亚热带季风及温带季风气候类型下分布最多,分别集中分布在华北和东北地区。整体看来,不同气候类型在一定程度上影响土壤渗透性的优劣,但其并不是直接影响因子。而是通过影响土壤类型、植被类型等因子来间接地影响、改善土壤渗透性,应更进一步探讨其他因子对提高渗透力的作用。

2.2.2 植被类型对土壤渗透性的影响 不同林分类型土壤渗透能力由低到高的顺序排列为裸地 $<$ 草本群落 $<$ 竹林群落 $<$ 针叶林群落 $<$ 针阔混群落 $<$ 阔叶群落。由图 4 可知,裸地对土壤水分的渗透能力显著低于其他植物群落,这表明植被能在一定程度上改善土壤结构,显著提高土壤的渗透性能。从 LSD 检验结果可以看出,除裸地及草本外,阔叶林、针阔混交林、针叶林及竹林 4 种林分类型土壤渗透力整体变化

幅度并不明显。在全国尺度上,不同林分类型对土壤渗透性的影响并不显著,这与以往样地尺度上,不同植被类型间土壤渗透力存在显著差异的结果不同。以往的研究中,在样地尺度上关于不同植被类型对土壤渗透性影响,并没有表现出一致的规律。广西猫儿山保护区内 A(高山矮林)、B(铁杉林)、C(水青冈林)、D(阔叶林)及 E(毛竹林)5 种典型林分类型,林下表层土渗透性排序为 $E > C > A > B > D$ ^[13],毛竹林林下土壤渗透性最强,针叶林对水分的渗透力最差;但江宁小流域内,各林分土壤渗透性表现为马尾松林 > 杉木林 > 栎林 > 毛竹林^[14]。不同林分林下土壤渗透力的有所差异,原因是在于植被生长、发育过程中对土壤养分、结构的改善作用。此时,更应注重其他因子对土壤渗透性能的影响。

2.2.3 土壤类型对土壤渗透性的影响 研究区域内主要涉及砂壤、棕壤、红壤、黄壤及紫色土 5 种土壤类型,不同土壤类型间土壤渗透力差异明显。由图 4 可知,砂壤土对土壤水分的渗透作用最强,其次是棕壤、红壤及黄壤,紫色土的渗透力最差。在空间分布情况看来,黄壤、棕壤及红壤分布最为广泛,但这 3 种土壤类型间渗透力差异不显著;而紫色土集中分布于我国西南部,这与上文土壤渗透力空间变化情况一致。整体看来,在全国尺度上,不同土壤类型对土壤渗透力的影响并不大。这与在以往研究中样地尺度上不同土壤类型对土壤渗透力的强弱有一定影响的结论有所不同,原因可能在于本文所用分析数据缺少对土壤内部结构数据。所以,在今后的研究中,更应加强对土壤结构、团聚体等因子对土壤渗透力的影响。

2.2.4 土层深度对土壤渗透性的影响 由图 4 可知,经 LSD 检验发现,0—20 cm 土层土壤渗透性显著高于其他 3 个土层,渗透性能最好;20—40 cm 土层渗透性次之;而 40—60 cm 与 60—80 cm 2 个土层土壤稳渗速率没有显著差异,都表现出较差的土壤渗透性能力。表明土层深度达到一定程度时,土层深度不再是影响土壤渗透力的重要因子。从整体上看,表层土壤对水分的渗透性能最好,且随着土层的加深,林下土壤对降水的渗透能力越弱。

2.2.5 林龄对土壤渗透性的影响 由图 4 可知,随林龄的增加,土壤渗透性呈现微弱上升的趋势,但不明显。对两者进行相关性分析发现,林龄对土壤渗透性能并不存在显著的线性关系($P=0.09$),关系表达式为: $y=0.0041x+0.24$, $R^2=0.398$ 。式中: y 为稳渗速率对数值(mm/min); x 为林龄(a)。这与以往样地尺度上的研究随林龄增加,林下土壤渗透性会显著

提高的结果不同,在全国尺度上,林龄对土壤渗透力的提升并无显著影响,这表明除林龄这一因子,其他因素的影响可能抑制、抵消林龄对渗透力的正效应。

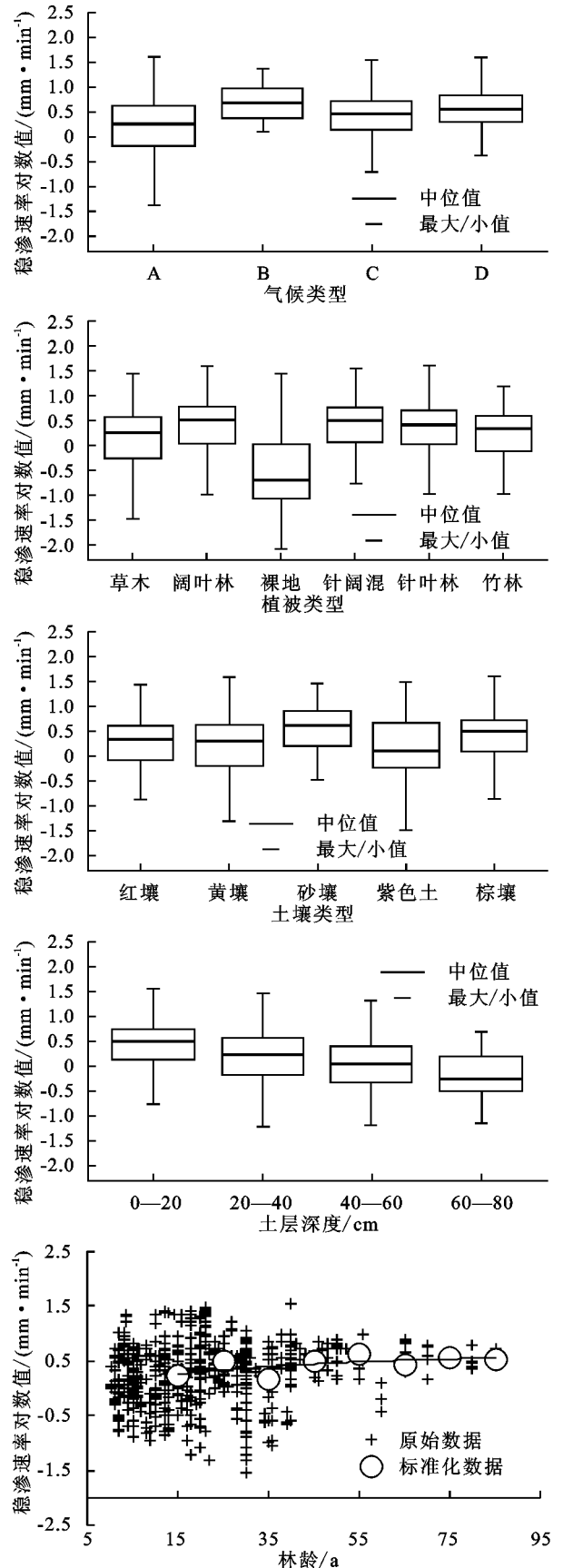


图 4 各环境因子对土壤渗透性的影响

2.2.6 非毛管孔隙对土壤渗透性的影响 通过相关性分析发现,非毛管孔隙度和土壤稳渗速率之间存在极显著的正相关性关系($P < 0.001$),关系式表达为 $y = -0.0017x^2 + 0.09x - 0.4262, R^2 = 0.424$ 。式中: y 为稳渗速率对数值(mm/min); x 为非毛管孔隙度(%)。当非毛管孔隙度在 $0 \sim 30\%$ 时,随着非毛管孔隙度的增加,土壤稳渗速率显著提高($P = 0.001$)。本研究发现,土壤中非毛管孔隙数量对土壤渗透性的影响存在一个阈值,当非毛管孔隙度大于 30% 时,随着非毛管孔隙度增加与以往研究报道土壤渗透性增加的趋势不一致,甚至出现下降的趋势(图 5)。

量(%)。从整体上来看,土壤有机质含量的高低显著影响土壤渗透性能的优劣,表明土壤中有机质的含量是影响土壤渗透性能的主要因素之一。土壤中含有的有机质越多,土壤结构会得到一定程度的改善,从而能有效提高林地土壤入渗能力(图 5)。

2.2.8 容重对土壤渗透性的影响 容重是保证土壤结构好坏的重要指标。容重与土壤渗透力之间存在极显著的相关关系($P = 0.0002$),且两者关系呈现抛物线规律。从图 5 可以看出,当土壤容重大于 $1.0 \text{ g}/\text{cm}^3$ 时,土壤渗透力随着土壤容重的升高而下降;而当土壤容重在 $0.35 \sim 1.0 \text{ g}/\text{cm}^3$ 时,土壤渗透力受容重影响不大。从整体上看,容重的大小与土壤渗透性能的好坏密切相关,是影响林地渗透力的主要因素之一。且土壤容重越大,土壤渗透力越弱;反之,则渗透性能越好。容重越小,表明土壤结构越好,即土壤中孔隙数量丰富。当降水产生时,林地土壤容重小的相较于林地容重大的土壤拥有更好的渗透力,能有效地减少地表径流的形成,有利于森林水源涵养,并加强了森林水土保持功能。本研究通过整合大量数据进一步表明,容重对土壤渗透性的影响存在某个阈值,当容重小于 $1.0 \text{ g}/\text{cm}^3$ 时,随着容重的减少与文献报道土壤渗透性增加的趋势不一致。此时其他因子对土壤渗透性的影响更重要。

2.3 土壤渗透性结构方程模型

通过构建 SEM 模型经过模型设定、模型拟合、模型评价、模型修正 4 个阶段,来研究分析土壤渗透性与影响因子、影响因子与影响因子之间的关系^[15],以期得到解释力最强、对数据拟合较好的结构方程模型,以更好地探究土壤水分入渗过程。由该模型可以看出,土壤渗透性与纬度之间的通径系数为 0.4,即随纬度增加土壤渗透性增强。非毛管孔隙度与土壤容重之间存在显著的负相关关系,土壤容重越大非毛管孔隙度越少,其通径系数为 -0.39 。随土层深度增加,土壤渗透力呈现下降趋势,贡献率为 0.08。容重与土壤渗透性能之间存在负相关关系,容重越小,土壤渗透性越好^[16]。但在该模型中,土壤容重对土壤渗透力的影响并不明显,直接及间接影响系数分别为 $-0.04, -0.13$ 。海拔通过改变土壤容重间接影响土壤渗透力,对土壤渗透力有微弱正效应,影响系数为 0.05,而直接影响系数为 -0.14 (图 6)。海拔并不直接影响土壤渗透力的优劣,而是通过影响林地内小气候及降水情况来间接改变土壤发育及其结构的形成,进而影响林地土壤渗透力^[17]。总体来说,海拔对土壤渗透力有一定的负效应,但其并不是影响土壤渗透力的主要因子。

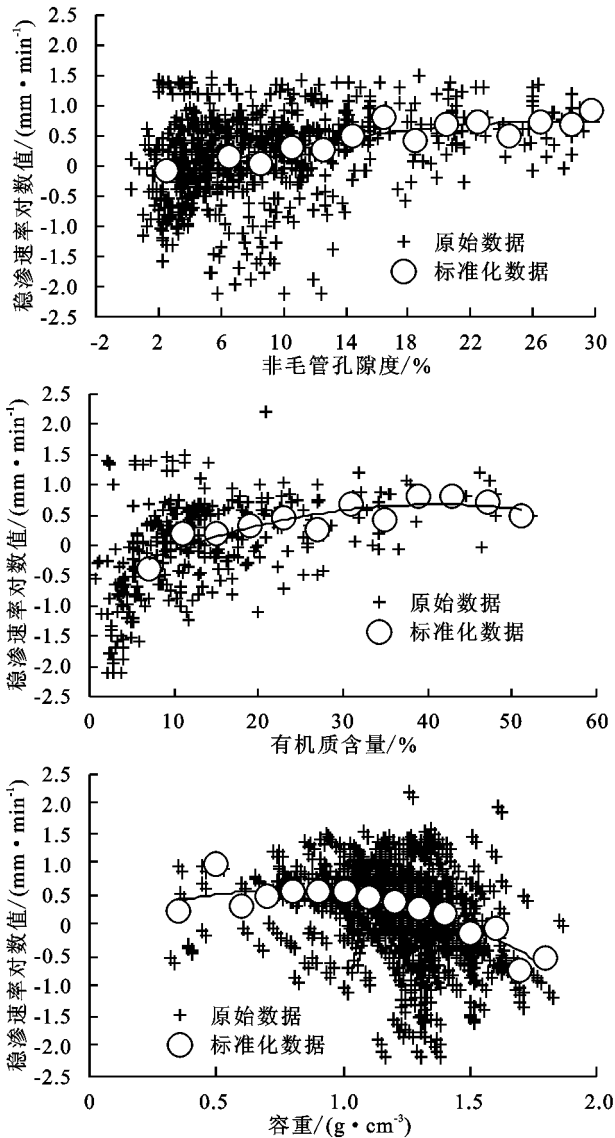


图 5 土壤理化性质对土壤渗透性的影响

2.2.7 有机质对土壤渗透性的影响 土壤中有机质含量的多少在程度上决定了土壤结构的好坏。分析两者之间的相关关系发现,土壤渗透性与土壤有机质含量之间存在极显著的正相关关系($P = 0.00194$),关系表达式为: $y = 0.0008x^2 - 0.0632x, R^2 = 0.792$ 。式中: y 为稳渗速率对数值(mm/min); x 为有机质含

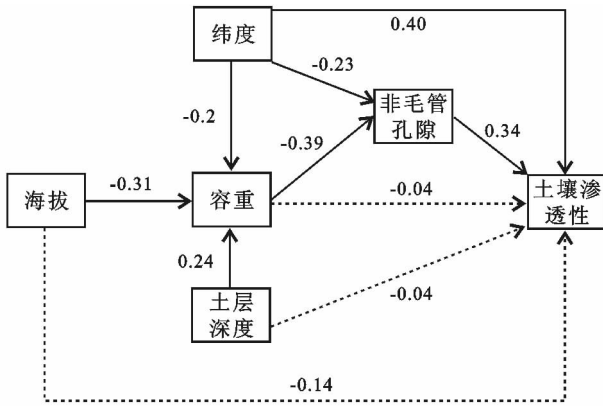


图 6 土壤渗透性影响因子结构方程模型

3 讨论与结论

(1) 全国土壤渗透力变化具有区域性, 华北、东北地区土壤渗透力明显优于西南地区; 且随纬度及海拔的升高, 土壤渗透力有所提高。为更好探究全国尺度上土壤水分渗透过程, 在今后的研究中应加强对西北地区土壤渗透性的报道。

(2) 气候、植被类型、土壤类型及林龄对土壤渗透力有一定的影响但并不是主导因子; 土壤理化性质及土层深度变化对土壤渗透力的影响更大; 表层土土壤对水分的渗透力显著优于深层土。但容重小于 1.0 g/cm^3 时, 土壤渗透力受容重影响不大。这与以往研究中, 认为随着容重的减少与文献报道土壤渗透性增加的趋势不一致。这是由于此时其他影响因子对土壤渗透性的作用更大。当土壤容重大于 1.0 g/cm^3 时, 土壤渗透力则随着土壤容重的升高而下降。同时, 有机质含量对土壤渗透性的影响也存在一个阈值, 当有机质含量大于 30% 时, 其对土壤渗透性的影响不大; 然而在林下土壤有机质含量低、地力差的情况下, 通过实施能增加土壤有机质含量的措施往往能提升林地土壤入渗能力, 加强林地水源涵养及保土保水的能力。

(3) 土壤是一个复杂的有机整体^[18], 以往的研究多以简单相关分析和回归分析探讨各因子(土壤容重、非毛管孔隙、有机质含量、林龄、海拔、土层深度)与土壤渗透性的关系, 而忽略了各因子间的相互作用。大多学者^[19]研究都认为容重及有机质含量是影响土壤渗透性的主导因子, 但也有学者提出容重与有机质含量虽能在一定程度上影响土壤渗透性, 但不能精确描述土壤渗透性的变化。结构方程模型结果显示, 各因子均通过直接或间接地影响土非毛管孔隙度的高低来影响土壤渗透力。非毛管孔隙决定了森林的蓄水能力, 影响土壤的通透性, 有效帮助降水及时下渗^[20]。非毛管孔隙度才是影响土壤渗透力的主导因子。

参考文献:

[1] 刘峰. 广西公益林主要林分类型土壤物理性质的年动态

及其水源涵养价值研究[D]. 南宁: 广西大学, 2016.

- [2] 王颖, 杨新兵. 冀北山地 6 种林分类型土壤水分—物理性质变化[J]. 水土保持研究, 2017, 24(3): 108-112.
- [3] 田超, 杨新兵, 李军, 等. 冀北山地不同海拔蒙古栎林枯落物和土壤水文效应[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 222-226.
- [4] 魏玲娜, 陈喜, 程勤波, 等. 红壤丘陵区土壤渗透性及其受植被影响分析[J]. 中国科技论文, 2013, 8(5): 377-380.
- [5] 李建兴, 何丙辉, 谔云. 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): 1536-1543.
- [6] 刘青柏, 刘明国, 王玉涛, 等. 不同林型立地土壤水分性状及其持水能力的比较[J]. 干旱区研究, 2011, 28(5): 775-779.
- [7] 徐昕, 刘晓勇, 江柳春, 等. 江西省生态公益林 5 种典型林分类型土壤性质特点分析[J]. 南方林业科学, 2016, 44(5): 54-57.
- [8] 喻明美, 谢正生. 广州市白云山 5 种森林类型的土壤渗透性研究[J]. 水土保持研究, 2011, 18(1): 153-156.
- [9] 洪宜聪. 杉木闽粤栲混交林分特征与水土保持功能研究[J]. 江苏林业科技, 2016, 43(5): 19-24.
- [10] 鲁绍伟, 陈波, 潘清华, 等. 北京山地 7 种人工纯林枯落物及土壤水文效应[J]. 内蒙古农业大学学报, 2013, 34(5): 53-59.
- [11] 李志, 袁颖丹, 胡耀文, 等. 海拔及旅游干扰对武功山地草甸土壤渗透性的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(2): 635-645.
- [12] 王西石, 储诚进. 结构方程模型及其在生态学中的应用[J]. 植物生态报, 2011, 35(3): 337-344.
- [13] 李海防, 王金叶, 刘兴伟, 等. 广西猫儿山主要林型水源涵养功能研究[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(1): 50-53.
- [14] 黄进, 张金池, 陶宝先. 江宁小流域主要森林类型水源涵养功能研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1): 182-186.
- [15] Hooper D, Coughlan J, Mullen M R. Structural equation modeling: Guidelines for determining model fit [J]. Electronic Journal on Business Research Methods, 2008, 6(1): 141-146.
- [16] Sun D, Yang H, Yang M, et al. The effects of land use change on soil infiltration capacity in China: A meta-analysis [J]. Science of the total Environment, 2018, 626: 1394-1401.
- [17] 钟兆全. 闽北毛竹林土壤有机碳含量特征及其影响因素[J]. 福建林业科学, 2017, 44(2): 37-42.
- [18] 王松山, 梁东丽, 魏威, 等. 基于路径分析的土壤性质与砾形态的关系[J]. 土壤学报, 2011, 48(4): 823-830.
- [19] 李芳念, 杨春玉. 不同林龄马尾松林土壤水源涵养功能研究[J]. 现代农业科技, 2014, 2(13): 177-182.
- [20] Porzig E L, Seavy N E, Owens E B, et al. Field evaluation of a simple infiltration test and its relationship with bulk density and soil organic carbon in California rangelands [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 72(2): 200-206.