

青海省东部不同土地利用方式下土壤饱和导水率分布及其影响因素

王紫薇¹, 邵明安^{1,2,3,4}, 黄来明^{2,3,4}, 裴艳武¹, 李荣磊¹

(1.西北农林科技大学资源环境学院,陕西 杨凌 712100;

2.中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室,北京 100101;

3.中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,
陕西 杨凌 712100;4.中国科学院大学资源与环境学院,北京 100049)

摘要: 研究高寒地区土壤饱和导水率分布特征及其影响因素可为评估脆弱生态系统水源涵养能力和构建区域水文模型提供参数。通过测定青海省东部南北样线 24 个样点(0—30 cm)土壤基本理化性质和饱和导水率(K_s),分析了不同土地利用方式下 K_s 分布特征及其影响因素。结果表明: K_s 均值表现为林地(1.89 cm/h) > 草地(1.62 cm/h) > 农地(1.41 cm/h),其中农地 K_s (0.10~3.92 cm/h)随着土层深度增加逐渐减小,而林地(0.28~7.69 cm/h)和草地 K_s (0.10~5.34 cm/h)随土层深度增加表现为先增加后减小。不同利用方式下 K_s 均与 pH、容重、孔隙度、黏粒含量、有机质含量及饱和含水量显著相关($P < 0.05$)。利用多元回归分析获得了农地以总孔隙度、非毛管孔隙度和饱和含水量为输入因子的 K_s 传递函数,林地以毛管孔隙度和非毛管孔隙度为输入因子的 K_s 传递函数和草地以容重、非毛管孔隙度和饱和含水量为输入因子的 K_s 传递函数。研究结果可为其他高寒地区不同土地利用方式下 K_s 的模拟和预测提供参考。

关键词: 高寒地区; 土地利用方式; 饱和导水率; 影响因素; 土壤传递函数

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)03-0150-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.03.021

Distribution and Influencing Factors of Soil Saturated Hydraulic Conductivity Under Different Land Use Patterns in Eastern Qinghai Province

WANG Ziwei¹, SHAO Ming'an^{1,2,3,4}, HUANG Laiming^{2,3,4}, PEI Yanwu¹, LI Ronglei¹

(1.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100;

2.Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101; 3.State Key Laboratory of Soil Erosion and

Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100; 4.College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: The investigation of soil saturated hydraulic conductivity and its influencing factors in the alpine region is critical for evaluating water conservation capacity of the fragile ecosystem and constructing regional hydrological modeling. The distribution and influencing factors of soil saturated hydraulic conductivity (K_s) under different land use patterns were studied by measuring soil physicochemical properties and K_s in the 0—30 cm soil layers along a north-south transect in the Eastern part of Qinghai Province. The results showed that the average value of K_s followed the decreasing order of forestland (1.89 cm/h) > grassland (1.62 cm/h) > farmland (1.41 cm/h). The K_s of farmland (0.10 ~ 3.92 cm/h) decreased gradually with the increasing of soil depth, while K_s of forestland (0.28 ~ 7.69 cm/h) and grass (0.10 ~ 5.34 cm/h) land increased first and then decreased with the increasing of soil depth. K_s was significantly correlated with soil physical

收稿日期:2020-11-05

资助项目:第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0306);中国科学院青年创新促进会会员项目(2019052);中国科学院地理科学与资源研究所优秀青年人才项目(2017RC203);中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放基金项目(A314021402-2010)

第一作者:王紫薇(1998—),女,硕士研究生,主要从事土壤物理研究。E-mail:wangziwei@163.com

通信作者:邵明安(1956—),男,研究员,主要从事土壤物理研究。E-mail:mashao@ms.iswc.ac.cn

黄来明(1984—),男,副研究员,主要从事土壤时空变化与生态水文研究。E-mail:huanglm@igsrr.ac.cn

and chemical properties such as pH, bulk density, porosity, clay content, organic matter content and saturated water content ($P<0.05$). The multiple regression analysis showed that the K_s pedo-transfer function equations of farmland was obtained using total porosity, non-capillary porosity and saturated water content as input parameters, the K_s pedo-transfer function equation of forestland was obtained by using capillary porosity and non-capillary porosity as input parameters, and the K_s pedo-transfer function equation of grassland was obtained by using bulk density, non-capillary porosity and saturated water content as input parameters. The results could provide reference for the simulation and prediction of K_s under different land use patterns in other alpine regions.

Keywords: alpine region; land use pattern; saturated hydraulic conductivity; influencing factors; pedo-transfer function equation

土壤饱和导水率(K_s)是地球表层系统科学研究中常用的物理参数之一,它反映了田间自然状态下土壤的饱和渗透性能与饱和水流通量。明确不同地区 K_s 分布特征及其影响因素是揭示区域土壤水分、溶质运移规律和建立相关水文模型的前提^[1-3],同时可为定量评估生态系统水源涵养能力和合理设计灌排系统提供依据。目前,许多学者^[4-7]研究了 K_s 的时空分布特征、影响因素及传递函数预测模型,为理解区域水土过程和评估生态系统服务功能提供了重要保障。

已有研究^[8-12]表明,不同地区或同一地区不同地形部位 K_s 具有明显的空间异质性,这主要是由于土壤性质差异而引起的;张君玉等^[8]研究表明,晋西黄土丘陵区 K_s 与土壤容重、非毛管孔隙度和有机质含量存在显著相关关系;王玮璐等^[9]研究表明,在青海高寒区毛管孔隙度和有机质含量是影响 K_s 的主要因子;方望等^[10]研究了南方红壤区典型农田 K_s 及其影响因素表明,土壤容重是影响 K_s 的最主要因素,而有机质含量和黏粒含量的影响次之。可见,不同土壤性质对 K_s 的影响不同,并且不同地区或不同空间尺度下 K_s 的主控因子具有一定差异^[11]。除了土壤性质的影响,不同土地利用方式下 K_s 分布特征也具有显著差异^[8,12],这主要归因于农、林、草地土壤孔隙结构及根系分布特征的差异。目前,关于不同土地利用方式下 K_s 的分布特征及其影响的研究多集中于黄土丘陵区、桂北山区及西南喀斯特地区,而对青海高寒区不同土地利用方式下 K_s 分布特征及其影响因素的研究较少。基于此,本研究选取青海省东部南北样线不同土地利用方式下 0—10,10—20,20—30 cm 土壤为研究对象,通过测定土壤基本理化性质(pH、容重、颗粒组成、有机质含量、孔隙度和饱和含水量)和 K_s ,分析了高寒山区 K_s 分布特征及其影响因素,以期为区域土壤水资源管理及流域水文模型构建提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

青海省位于中国西北内陆,全省均属于青藏高原

范畴。总面积约 72.23 万 km^2 ,占全国总面积的 1/13。总地势西高东低,海拔平均 3 000 m 以上,其中 4/5 以上地区为高原。青海省远离海洋,属于高原大陆性气候,各地年平均气温 $-5.1\sim 9.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,年平均降水量 50~550 mm。日照时间长,多风、少雨,东西部降雨情况差异较大,东部雨水多,西部干燥多风,较为寒冷。省内河流众多,是黄河、长江主要水系的发源地,有“江河源头”之称;地形复杂,地貌多样,兼具青藏高原、黄土高原和干旱盆地 3 种地形地貌^[13]。本研究区位于青海省东部地区($32^{\circ}52'\text{—}36^{\circ}13'\text{N}$, $98^{\circ}23'\text{—}102^{\circ}29'\text{E}$),为青藏高原向黄土高原的过渡带,该地区土壤类型主要包括灰钙土、栗钙土、黑钙土、灰褐土、山地草甸土、高山草甸土。

1.2 样品采集与分析

2019 年 8 月,在考察青海省东部地区的地形地貌后,选取南北样线不同土地利用方式下 24 个采样点(图 1),采样点分别位于海东市(6 个)、黄南藏族自治州(6 个)、海南藏族自治州(3 个)和果洛藏族自治州(9 个)。分别采集 0—10,10—20,20—30 cm 原状土和扰动土样品。采样点土地利用方式包括农地、林地和草地,其中农地(主要指 1 年生农作物地)3 个,林地(包括人工林地、天然林地和高山灌木林)8 个,草地(包括高山草甸和人工草地)13 个,每个样点采集 3 次重复,共计 216 个原状土和 216 个扰动土样品。

原状土采用环刀法采集,用于测定土壤容重、饱和导水率、田间持水量、饱和含水量、毛管孔隙度和总孔隙度。饱和导水率利用恒定水头法测定,将环刀在水中浸泡至水分饱和时,除去盖子垫 1 层滤纸后,套 1 个空环刀,接口处用胶布封好,之后连接马氏瓶,待出水稳定后开始测定单位时间内水流通量。测定方法参照《森林土壤水分—物理性质的测定》(LY/T 1215—1999)^[14]。

扰动土壤样品带回实验室自然风干后,挑去枯枝落叶、根系和砾石,研磨并分别过(2,1,0.25 mm)筛,用于测定土壤 pH、颗粒组成、全氮、全磷、速效钾和

有机质含量等基本理化性质。土壤 pH 采用浸提电位法测定(水土比 2.5 : 1),颗粒组成采用 MS-2000 激光粒度仪测定,有机质采用重铬酸钾氧化-外加热法测定,方法参照《土壤农化分析》^[15]。

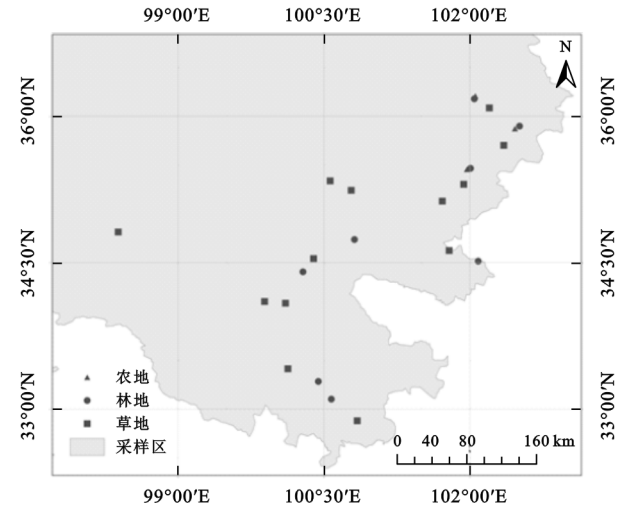


图 1 青海省东部不同土地利用方式下采样点分布

1.3 数据处理

采用 SPSS 17.0 软件进行统计分析、方差分析、Pearson 相关分析和多元回归分析,采用 Origin 9.65 软件绘图。

2 结果与分析

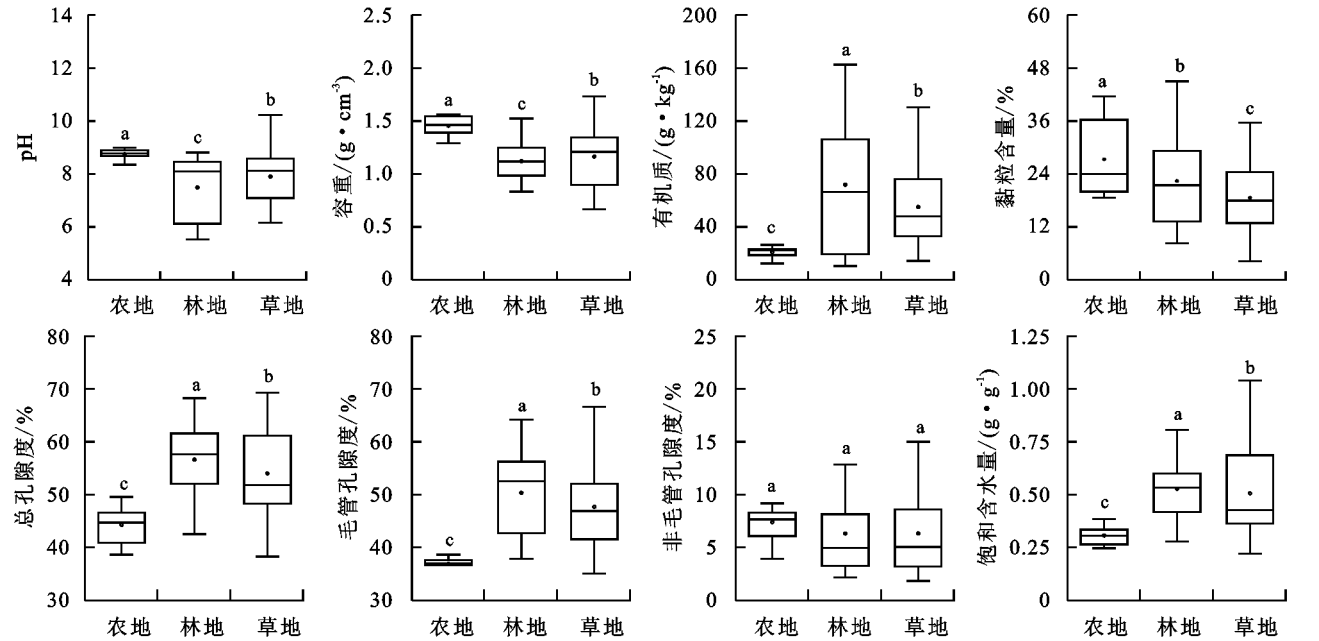
2.1 不同土地利用方式下土壤基本理化性质剖面分布特征

由图 2 可知,农地、林地和草地土壤 pH 变化范围分别为 8.35~9.00,5.53~8.81,6.16~10.23,平均值分别为 8.75,7.48,7.91。农地土壤 pH 均值显著高于林地和草地 ($P<0.05$)。容重是土壤最基本的物

理性质之一,能够综合反映土壤松紧度及水土流失状况。农地、林地和草地容重变化范围分别为 1.29~1.56,0.83~1.52,0.67~1.73 g/cm³,均值分别为 1.46,1.12,1.16 g/cm³。农地土壤容重均值显著高于林地和草地 ($P<0.05$)。

土壤机械组成是反映土壤质地的重要指标,不同土地利用方式下土壤黏粒含量均值表现为农地(27.33%)>林地(22.41%)>草地(18.63%),且农地、林地和草地之间黏粒含量均存在显著差异性 ($P<0.05$)。梁博等^[16]研究了雅鲁藏布江中游不同土地利用类型对土壤理化性质及颗粒分形特征的影响表明,农地黏粒含量最高。

农地、林地和草地土壤有机质含量平均值分别为 20.89,71.91,55.11 g/kg。林地土壤有机质含量均值显著高于农地和草地 ($P<0.05$)。土壤孔隙是影响土壤渗透性能、决定地表产流量和产流时间的关键要素。不同土地利用方式下土壤总孔隙度和毛管孔隙度均值均表现为林地(56.63%,50.31%)>草地(54.02%,47.69%)>农地(44.27%,36.88%),且农地、林地和草地总孔隙度和毛管孔隙度之间均存在显著差异性 ($P<0.05$),这与刘艳丽等^[17]对不同土地利用方式对黄河三角洲土壤物理特性的影响的研究结果相似。不同土地利用方式下土壤非毛管孔隙度无显著性差异 ($P>0.05$)。不同土地利用方式下饱和含水量均值表现为林地(0.53 g/g)和草地(0.51 g/g)显著高于农地(0.31 g/g) ($P<0.05$),表明林地和草地水源涵养能力明显优于农地,这主要是由于农地土壤通透性能较差,土壤较为紧实,饱和含水量较低而导致的。



注:图柱上方不同小写字母表示不同土地利用方式间差异显著($P<0.05$);·表示平均值;—表示最大(小)值;——表示中位值。

图 2 不同土地利用方式下土壤基本理化性质分布特征

2.2 不同土地利用方式下土壤饱和导水率描述性统计分析

由表 1 可知,农、林、草地 0—30 cm 土壤 K_s 变化范围分别为 0.10~3.92,0.28~7.69,0.10~5.34 cm/h,变异系数分别为 0.41~0.95,0.71~0.81,0.66~0.73,均属于中等变异。不同土地利用方式下 0—30 cm 土壤 K_s 均值大小表现为林地(1.89 cm/h)>草地(1.62 cm/h)>农地(1.41 cm/h),因此林地土壤水分渗透性能最高,可以有效减少地表径流,防止水土流失。张君玉等^[8]与蒙吉军等^[18]的研究结果也表明,林地土壤水分渗透性能最高,与本文研究结果一致。

这主要是由于农地受到翻耕的影响,植物根系不发达,所以林地与草地的平均 K_s 高于农地。不同土地利用方式下 0—10 cm 土壤 K_s 均值没有显著差异($P>0.05$),而农地 10—20,20—30 cm 土壤 K_s

均值却显著低于林地和草地($P<0.05$)(表 1),这主要是由于农地在长期耕作和机械反复碾压下形成了紧实的犁底层。翟振等^[19]研究表明,犁底层土壤容重较高,总孔隙度低,渗水性弱,因此饱和导水率较低。

不同土层深度(0—10,10—20,20—30 cm)农地 K_s 变化范围分别为 0.40~3.92,0.80~2.53,0.10~2.19 cm/h;林地 K_s 变化范围分别为 0.28~6.08,0.84~7.69,0.45~5.09 cm/h;草地 K_s 变化范围分别为 0.14~4.94,0.25~5.34,0.10~3.85 cm/h。农、林、草地 0—10,10—20 cm 土壤饱和导水率均显著高于 20—30 cm 土壤($P<0.05$)。蔡路路等^[12]研究了喀斯特地区不同土地利用方式下土壤饱和导水率随土层深度的分布特征,结果也表明,同一土地利用方式下深层土壤饱和导水率低于表层土壤。

表 1 不同土地利用方式下 K_s 描述性统计特征值

土地利用 类型	土层 深度/cm	$K_s/(cm \cdot h^{-1})$					变异系数
		最大值	最小值	均值	极差	标准差	
农地	0—10	3.92	0.40	2.03Aa	3.53	1.32	0.65
	10—20	2.53	0.80	1.43Ba	1.73	0.58	0.41
	20—30	2.19	0.10	0.77Bb	2.09	0.73	0.95
林地	0—10	6.08	0.28	1.87Aa	5.80	1.32	0.71
	10—20	7.69	0.84	1.96Aa	6.85	1.59	0.81
	20—30	5.09	0.45	1.83Ab	4.64	1.37	0.75
草地	0—10	4.94	0.14	1.74Aa	4.80	1.15	0.66
	10—20	5.34	0.25	1.77ABa	5.32	1.30	0.73
	20—30	3.85	0.10	1.35Ab	3.75	0.91	0.67

注:表中同列不同大写字母表示相同土层不同土地利用方式间差异显著($P<0.05$);同列不同小写字母表示相同土地利用方式不同土层间差异显著($P<0.05$); K_s 数据统一用 10 ℃ 时的饱和导水率表示。

2.3 土壤基本理化性质与饱和导水率的相关关系

土壤基本理化性质是影响 K_s 大小的重要因素。本文选取 pH、容重、有机质含量、孔隙度(总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度)、饱和含水量和黏粒含量等土壤指标与 K_s 进行 Pearson 相关分析。

由图 3 可知,不同土地利用方式下(农、林、草地) K_s 均与非毛管孔隙度呈显著正相关($P<0.05$),这与 Fu 等^[20]在西南喀斯特地区的研究结果一致。农地和草地土壤 K_s 还与有机质含量、总孔隙度及饱和含水量呈显著正相关($P<0.05$),而与土壤容重呈显著负相关($P<0.05$)。林地土壤 K_s 与 pH、容重、有机质含量、总孔隙度、饱和含水量和黏粒含量的相关性均不显著($P>0.05$),但与毛管孔隙度呈显著负相关($P<0.05$),这与毛娜等^[1]在黄土区坡面尺度不同植被类型下的研究结果不同。

3 讨论

不同土地利用方式下,农地 pH、容重和黏粒含量均

值显著高于林地与草地(图 1),这可能是由于农田土壤温度和含水量较高,高温增加了地表蒸发,水分蒸发后导致土壤盐分含量较高,从而提高了土壤 pH^[21]。同时长期耕作导致农田土壤中形成犁底层,从而导致农地土壤容重显著高于林地和草地^[22],而且农地又受到施肥和灌溉的影响,土壤中不断输入细土颗粒,有助于促进土壤团粒结构的形成,导致农地的黏粒含量较高。林地有机质含量显著高于农地和草地,这是由于高寒地区林地输入的枯枝落叶和草毡层中含有大量草根,通过多种生化反应形成有机物质,是林地和草地土壤有机质的主要来源。相反,农地不断翻耕使得土壤呼吸作用显著高于林地和草地,加之农作物吸收和收获加速了有机质的分解和输出,从而导致农地土壤有机质含量显著减少^[23]。不同土壤性质(黏粒含量除外)的变异系数均表现为农地低于林地和草地,表明林地和草地土壤空间变异性高于农地,这主要与农地主要分布于地势平坦、海拔较低的冲积平原有关,而林地和草地分布区地形复杂多变。黏粒含量

变异系数表现为林地和草地低于农地,这主要与农地受到不同程度的施肥与灌溉等人为活动有关^[22]。

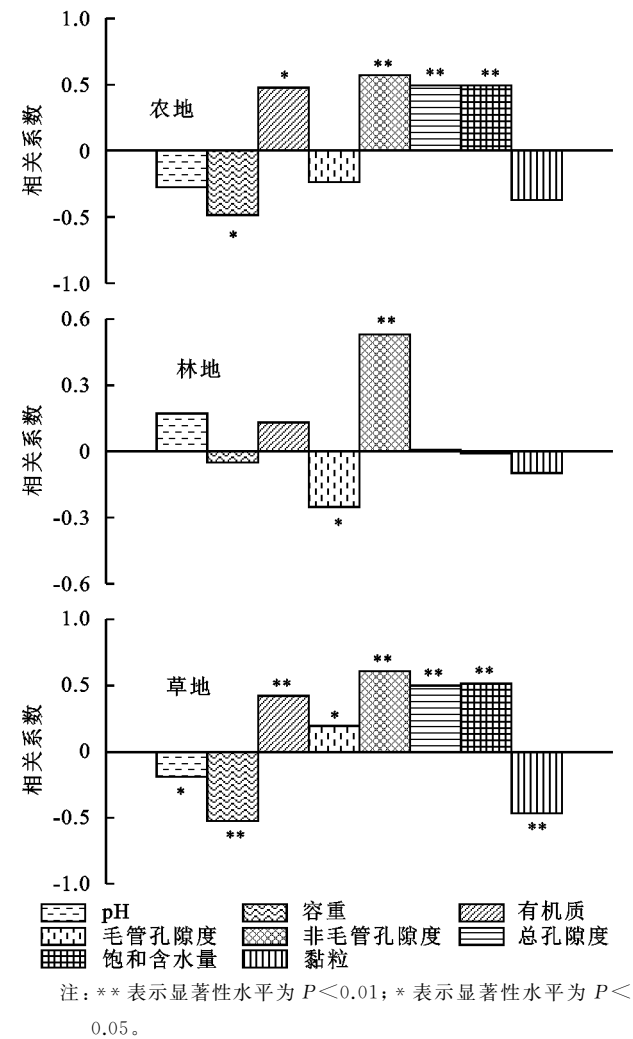


图 3 青海省东部不同土地利用方式下土壤 K_s 与土壤基本理化性质相关系数分布

农、林、草地 0—10, 10—20 cm 土壤饱和导水率均显著高于 20—30 cm 土壤,这主要归因于不同利用方式下粗根含量及根系总生物量均随土层深度增加而下降,从而导致深层土壤孔隙度降低。然而,0—10, 10—20 cm 土层 K_s 大小在农、林、草地之间变化趋势不同,农地由于耕作疏松作用 0—10 cm 土层 K_s

最高,而林地和草地 10—20 cm 土层 K_s 较高。林地和草地表层由于受到牛、羊等生物践踏的影响出现不同程度的压实,而 10—20 cm 土层林、草根系发达,有大量土壤动物(例如鼠、蚁等)活动,从而形成较多孔隙,因此林地和草地为 10—20 cm 土层 K_s 较高。

土壤有机质是团聚体形成过程中最重要的胶结物质,可以促进团聚体的形成和稳定,因此土壤有机质可以通过改善土壤结构,增加土壤孔隙度,从而间接影响土壤 K_s 。于冬雪等^[4]研究了黄土区不同土层饱和导水率空间变异及其影响因素表明,土壤容重较小时,土体疏松,孔隙度较大,土壤导水能力强;而土壤容重较大时,黏粒和粉粒等颗粒含量相对较高,致使土壤板结,孔隙度减小,土壤 K_s 减小。本研究结果显示,随着容重的增加,农地和草地 K_s 减小,土壤孔隙度显著降低。吕殿青等^[24]的研究结果进一步印证了这一结论。研究区林地海拔高度变化范围为 1 940~4 100 m,林分类型(包括乔木林地和灌木林地)及林龄(<10~30 年以上)差异较大,这可能是导致林地 K_s 与 pH、容重、有机质含量、总孔隙度、饱和含水量及黏粒含量相关性较弱的原因。

综上所述,不同土地利用方式下 K_s 的影响因素不同。由于不同土壤性质之间存在相互作用,且表现出极强的相关性。因此 K_s 与单一因子之间的相关系数往往不能正确反映它们之间的关系。为了筛选出不同土地利用方式下影响 K_s 变化相对重要的因子。本文选取与 K_s 显著相关的因素进行多元回归分析,在此基础上建立农、林、草地土壤 K_s 的传递函数(表 2),以为青海省东部地区不同土地利用方式下土壤 K_s 的模拟和预测提供参考。由表 2 可知,总孔隙度、非毛管孔隙度和饱和含水量是影响农地 K_s 的主要因子;毛管孔隙度和非毛管孔隙度是影响林地 K_s 的主要因子;容重、非毛管孔隙度与饱和含水量是影响草地 K_s 的主要因子,这与 Zhang 等^[25] 估算出以土壤颗粒组成、不同土地利用方式、容重、孔隙度、含水量、有机碳等为传递函数输入因子的结果相似。

表 2 青海省东部不同土地利用方式下土壤 K_s 传递函数拟合

土地利用方式	传递函数表达式	R^2	显著性水平(P)
农地	$\ln K_s = -9.423 + 0.459TP + 0.256NP - 41.705\theta_s$	0.61	<0.001
林地	$K_s = -4.452 + 1.017CP + 1.435NP$	0.34	<0.001
草地	$K_s = -1.498 - 0.027BD + 0.906\ln NP + 0.986\ln \theta_s$	0.52	<0.001

注: K_s 为饱和导水率(cm/h); TP 为总孔隙度(%); NP 为非毛管孔隙度(%); θ_s 为饱和含水量(g/g); CP 为毛管孔隙度(%); BD 为容重(g/cm³)。

4 结论

(1) 农地 K_s 随着土层深度的增加逐渐减小,而林地和草地 K_s 随着土层深度增加,表现为先增加后减小。不同土地利用方式下 K_s 均值大小表现为林地(1.89 cm/

h)>草地(1.62 cm/h)>农地(1.41 cm/h)。

(2) 不同土地利用方式下的土壤因植被种类和耕作方式的差异,对 K_s 有不同程度的影响。相关性分析表明,农地、林地与草地 K_s 与土壤基本理化性质间

均有不同程度的相关关系。

(3)本研究通过多元回归分析获得了以孔隙度、容重、饱和含水量为输入因子的土壤 K_s 传递函数 ($R^2=0.34\sim0.61, P<0.001$), 可为高寒区不同土地利用方式下土壤 K_s 的模拟和预测提供参考。

参考文献:

[1] 毛娜,黄来明,邵明安.黄土区坡面尺度不同植被类型土壤饱和导水率剖面分布及影响因素[J].土壤,2019,51(2):381-389.

[2] Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P, et al. Regional-scale variation and distribution patterns of soil saturated hydraulic conductivities in surface and subsurface layers in the loessial soils of China [J].Journal of Hydrology, 2013,487(2):13-23.

[3] Tommaso P, Renato M, Alessia F, et al. A pedotransfer function for field-scale saturated hydraulic conductivity of a small watershed [J].Vadose Zone Journal,2019, 18(1):1-15.

[4] 于冬雪,贾小旭,黄来明.黄土区不同土层饱和导水率空间变异与影响因素[J].土壤通报,2018,49(5):1073-1079.

[5] Michele R, Claudio G. Investigation of spatial and temporal variability of saturated soil hydraulic conductivity at the field-scale [J].Soil and Tillage Research, 2014, 135:28-40.

[6] Jarvis N, Koestel J, Messing I, et al. Influence of soil, land use and climatic factors on the hydraulic conductivity of soil [J].Hydrology and Earth System Sciences, 2013,17(12):5185-5195.

[7] Yang F, Zhang G L, Yang J L, et al.Organic matter controls of soil water retention in an alpine grassland and its significance for hydrological processes [J].Journal of Hydrology,2014,519:3086-3093.

[8] 张君玉,程金花,吕湘海,等.晋西不同土地利用方式下土壤饱和导水率的影响因素[J].水土保持通报,2013,33(6):57-61.

[9] 王玮璐,贺康宁,张潭,等.青海高寒区水源涵养林土壤机械组成和理化性质对其饱和导水率和持水能力的影响[J].植物资源与环境学报,2020,29(2):69-77.

[10] 方堃,陈效民,张佳宝,等.红壤地区典型农田土壤饱和导水率及其影响因素研究[J].灌溉排水学报,2008,27(4):67-69.

[11] Vereecken H, Kasteel R, Vanderborght J, et al. Up-

scaling hydraulic properties and soil water flow processes in heterogeneous soils: A review [J].Vadose Zone Journal,2007,6(1):1-28.

[12] 蔡路路,刘子琦,李渊,等.喀斯特地区不同土地利用方式对土壤饱和导水率的影响[J].水土保持研究,2020, 27(1):119-125.

[13] 马昊翔,陈长成,宋英强,等.青海省近 10 年草地植被覆盖动态变化及其驱动因素分析[J].水土保持研究, 2018,25(6):137-145.

[14] 中华人民共和国国家林业局.森林土壤水分—物理性质的测定:LY/T 12151999[S].北京:标准出版社, 1999.

[15] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,1999:25-38.

[16] 梁博,林田苗,任德智,等.土地利用方式对雅江中游土壤理化性质及颗粒分形特征的影响[J].土壤,2018,50(3):613-621.

[17] 刘艳丽,李成亮,高明秀,等.不同土地利用方式对黄河三角洲土壤物理特性的影响[J].生态学报,2015,35(15):5183-5190.

[18] 蒙古军,王雅,江颂.基于生态系统服务的黑河中游退耕还林生态补偿研究[J].生态学报,2019,39(15): 5404-5413.

[19] 翟振,李玉义,逢焕成,等.黄淮海北部农田犁底层现状及其特征[J].中国农业科学,2016,49(12):2322-2332.

[20] Fu T, Chen H, Zhang W, et al. Spatial variability of surface soil saturated hydraulic conductivity in a small karst catchment of southwest China [J].Environmental Earth Sciences,2015,74(3):2381-2391.

[21] 赵娟,刘任涛,刘佳楠,等.北方农牧交错带退耕还林与还草对地面节肢动物群落结构的影响[J].生态学报, 2019,39(5):1653-1663.

[22] 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.

[23] Song G H, Li L Q, Pan G X, et al. Topsoil organic carbon storage of China and its loss by cultivation [J]. Biogeochemistry,2005,74(1):47-62.

[24] 吕殿青,邵明安,刘春平.容重对土壤饱和和水分运动参数的影响[J].水土保持学报,2006,20(3):154-157.

[25] Zhang Y G, Marcel G S. Estimation of saturated hydraulic conductivity with pedotransfer functions: A review [J].Journal of Hydrology,2019,575:1011-1030.