

黄土丘陵区典型植被土壤物理性质差异及其对导水特性影响

李永宁¹, 王忠禹¹, 王兵^{1,2}, 张宝琦¹, 张娜娜¹

(1.西北农林科技大学水土保持研究所,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;2.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100)

摘要:选取黄土丘陵区12种典型植被样地,通过测定各样地不同土层植物残体生物量、土壤容重、毛管孔隙度、非毛管孔隙度及饱和导水率,研究各指标随土层深度和植被类型的变化规律及其对土壤饱和导水率的影响。结果表明:(1)除容重随土层深度增加外,植物残体、毛管孔隙度、非毛管孔隙度和饱和导水率均随土层深度减少,其中植物残体大多集中于表层土壤(0—10 cm),占总残体生物量的51.4%~85.7%。(2)不同植被类型其植物残体及土壤物理性质存在显著差异,乔木林地植物残体、农耕地土壤容重、灌木林地非毛管孔隙度及饱和导水率均最大,而毛管孔隙度与不同土地利用类型间无显著差异。(3)饱和导水率随植物残体生物量密度(0—10 cm)和土壤容重呈幂函数减小,随毛管孔隙度和非毛管孔隙度呈幂函数增大;土壤容重(BD)和非毛管孔隙度(NCP)是影响土壤饱和导水率(K_s)的主要因素,且土壤饱和导水率可表示为两者的综合非线性方程($K_s=0.6BD^{-4.717}NCP^{0.203}$, $P<0.01$, $R^2=0.63$, $NSE=0.50$)。此外,沙棘灌木林地平均饱和导水率最大,有利于降雨过程中土壤水分入渗,具有较强的水土保持功能。本研究结果可为黄土高原植被恢复生态水文效益评价提供理论依据。

关键词:典型植被;土地利用类型;土壤物理性质;饱和导水率;黄土丘陵区

中图分类号:S154.4

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2019)06-0176-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.06.025

Differences in Soil Physical Properties of Typical Vegetation in Loess Hilly Region and Effects on Water Conductivity

LI Yongning¹, WANG Zhongyu¹, WANG Bing^{1,2}, ZHANG Baoqi¹, ZHANG Nana¹

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess

Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100; 2.Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: In this study, soils from the sites of 12 vegetation plots were sampled, and plant residue, soil bulk density, capillary porosity, non-capillary porosity and saturated hydraulic conductivity were measured to discuss their variations in different soil layers and vegetation types. Besides, the effects of plant residue and soil properties on the saturated hydraulic conductivity were detected. The results showed that: (1) Soil bulk density increased with the increase of soil depth, while plant residue, capillary porosity, non-capillary porosity and saturated hydraulic conductivity decreased. Plant residue mainly existed in the top soil of 0—10 cm, which accounted for 51.4% to 85.7% of the total plant residue. (2) Soil properties and plant residue differed from vegetation types. In general, forest had the largest plant residue, cropland had the highest soil bulk density, and shrub land had the maximum non-capillary porosity and saturated hydraulic conductivity. While no significant difference of capillary porosity was found between different land use types. (3) Saturated hydraulic conductivity decreased with the plant residue (0—10 cm) and soil bulk density, while increased with capillary porosity and non-capillary porosity. Soil bulk density (BD) and non-capillary porosity (NCP) were key factors that affect the soil saturated hydraulic conductivity (K_s), which would simulated saturated hydraulic conductivity as a nonlinear function ($K_s=0.6BD^{-4.717}NCP^{0.203}$, $p<0.01$, $R^2=0.63$, $NSE=0.50$). Moreover, the shrub land of *Hippophae rhamnoides* L. had the maximum value of saturated hydraulic conductivity, which would promote the ability of water infiltration during the precipitation and thus had a

收稿日期:2019-04-15

资助项目:国家自然科学基金面上项目“基于RUSLE模型的黄土高原草地植被覆盖因子研究”(41771555);国家自然科学基金重点项目“退耕驱动近地表特性变化对侵蚀过程的影响及其动力机制”(41530858);国家重点研发计划项目“黄河流域生态系统变化的水资源效应与作用机理”(2016YFC0501603)

第一作者:李永宁(1993—),男,甘肃静宁人,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail:lyn450618@163.com

通信作者:王兵(1982—),男,陕西武功人,博士,副研究员,主要从事植被恢复与土壤侵蚀研究。E-mail:bwang@ms.iswc.ac.cn

great effect on soil and water conservation. The results of this study could provide a theoretical basis for evaluating the effects of vegetation restoration on ecological hydrological process on the Loess Plateau.

Keywords: typical vegetation; land use type; soil physical properties; saturated hydraulic conductivity; Loess Hilly region

饱和导水率是反映土壤入渗性能的一个重要指标,也是水文和土壤侵蚀模型中的重要参数,与土地利用类型、植被特征和土壤结构密切相关^[1]。饱和导水率对减少土壤流失和防治自然灾害有着重要意义^[2],其值越大,土壤水分入渗能力越强。土壤性质如容重^[3]、孔隙度^[4]、有机质^[5]、水稳性团聚体^[6]等可显著影响土壤饱和导水率。相关研究^[7-8]表明,土壤饱和导水率与容重存在负相关关系,而与孔隙度存在正相关关系,也有研究^[9]表明,土壤质地、植被群落特征及土层深度也会影响饱和导水率。一般而言,沙土相对于壤土具有较高的饱和导水率^[10],有植被覆盖的乔灌草地比裸地饱和导水率更大^[11],表层土壤饱和导水率大于深层土壤^[12]。

黄土高原自退耕还林(草)工程实施以来,生态环境得到显著改善,生态水文过程发生了重大变化^[13],而大面积退耕还林(草)后植被特征及土壤性质变化对土壤入渗过程的影响相对滞后,不同土地利用类型影响土壤入渗过程的相关机理、植被特征及土壤性质与入渗性能间的量化关系仍有待研究。基于此,本研究选取黄土高原丘陵沟壑区乔木林地、灌木林地、草本样地、农耕地 4 种土地利用类型、12 个典型植被样地,系统研究典型植被及土地利用类型对土壤饱和导水率的影响,探讨不同土层深度植物残体和土壤物理性质的差异及其对土壤饱和导水率的影响,量化植物残体生物量密度及土壤物理性质与饱和导水率的相互关系,以期对黄土高原植被恢复成效评价提供理论依据,为生态水文模型及土壤侵蚀模型提供基础参数。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验在陕西省安塞县水土保持综合试验站及纸坊沟小流域进行。研究区地貌类型为典型的黄土丘陵沟壑区,土壤类型主要为黄绵土和红胶土,土质结构疏松,极易发生侵蚀。该区多年平均气温 8.8℃,属暖温带半湿润向半干旱过渡区。年均降水量 505 mm,以夏秋季降雨为主,冬春季降雨较少^[14]。年均潜在蒸发量 1 035.5 mm,全年无霜期 157 d,年日照时间 2 415 h^[15]。常见植被类型主要有刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)、油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)、柠条(*Caragana korshinskii* Kom.)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)和白羊草(*Bothriochloa ischaemum* L.)等。

1.2 样地选择与土壤样品采集

基于黄土高原常见土地利用类型(乔木林地、灌木林地、草地和农地),于 2018 年 7 月选取刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)、油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)、柠条(*Caragana korshinskii* Kom.)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.)、狼牙刺(*Sophora viciifolia* Hance.)、杠柳(*Periploca sepium* Bunge)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、茵陈蒿(*Artemisia capillaries* Thunb.)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum* L.)、狗尾草(*Setaria viridis* L.)、鹅冠草(*Roegneria kamoji* Ohwi)及玉米(*Zea mays* Linn.) 12 种典型植被样地,每个样地设 2 组重复,沿样地对角线位置选择 3 个植被盖度较为一致的样方,每个样方分别用 100 cm³环刀采集 0—10, 10—20, 20—40 cm 土层的原状土样,取土结束后逐层进行回填。每个土层重复 3 次采样,即每种植被采样 18 个,共计采样 216 个,将每种植被每层土样的 6 次实测数据取其平均值作为试验结果,若有异常值需剔除,样地选取情况见表 1。

1.3 数据处理与分析

试验数据采用单因素 One-way ANOVA 方差分析中的 LSD 多重比较法。相关性分析通过对各因子取对数之后运用 Pearson 双侧检验。土壤饱和导水率的模拟对各指标取对数后采用非线性逐步回归分析,回归模型评估用决定系数(R^2)和纳什—萨克利夫模型有效性系数(NSE)。数据分析处理与图表制作采用 Excel 2010、SPSS 22.0 和 Origin 2017 等软件。

2 结果与分析

2.1 土壤中植物残体特征

各植被样地植物残体在不同土层中均存在显著差异($P < 0.05$,图 1)。其中白羊草样地在 0—10 cm 土层中植物残体生物量密度最大,为 0.025 g/cm³,是其他样地的 1.7~8.0 倍;沙棘样地在 10—20 cm 土层中植物残体生物量密度最大,为 0.007 g/cm³,是其他样地的 1.8~7.4 倍;油松样地在 20—40 cm 土层中植物残体生物量密度最大,为 0.003 g/cm³,是其他样地的 1.5~19.9 倍。此外,随土层深度的增加,各样地植物残体生物量均呈下降趋势,其中 0—10 cm 土层植物残体生物量占总生物量的 51.4%~85.7%,但较深土层间(10—20, 20—40 cm)无显著差异。对于不同土地利用类型,整体上各土层植物残体生物量均表现为自然植被样地(乔灌草地)显著高于农地,且

随土层深度的增加,植物残体生物量呈下降趋势。总体而言,0—40 cm 土层中乔木林地和灌木林地植物残体生物量密度几乎相等(0.014 g/cm³),分别是草地和农耕地的 1.2,1.7 倍(表 2)。

表 1 样地基本信息

土地利用类型	植被	经纬度	海拔/m	坡向	坡度/(°)	株高/m	林下植被/主要伴生种
乔木林地	刺槐	36°44′31″N,109°14′30″E	1291	东	32	7.75±1.96	沙蓬、狗尾草
	油松	36°46′02″N,109°15′57″E	1118	东北	23	7.27±1.13	沙蓬、狗尾草
	柠条	36°44′36″N,109°14′30″E	1266	东北	22	1.30±0.21	铁杆蒿、艾草
灌木林地	沙棘	36°51′18″N,109°18′48″E	1245	东北	10	2.50±0.56	沙蓬、早熟禾
	狼牙刺	36°45′03″N,109°15′14″E	1110	南	29	1.70±0.31	铁杆蒿
	杠柳	36°44′52″N,109°14′58″E	1171	东	13	1.15±0.36	铁杆蒿
	铁杆蒿	36°51′14″N,109°18′57″E	1250	西	28	0.28±0.05	旱芦苇
	茵陈蒿	36°52′18″N,109°20′09″E	1188	南	26	—	早熟禾
草本样地	白羊草	36°52′18″N,109°20′09″E	1186	南	26	0.23±0.08	铁杆蒿
	狗尾草	36°44′52″N,109°14′43″E	1229	西	18	0.61±0.27	早熟禾
	鹅冠草	36°44′30″N,109°14′32″E	1255	南	19	—	狗尾草、早熟禾
农耕地	玉米	36°51′18″N,109°18′48″E	1150	南	—	—	*

注:—表示未调查;*表示无;株高数据为均值±标准差。

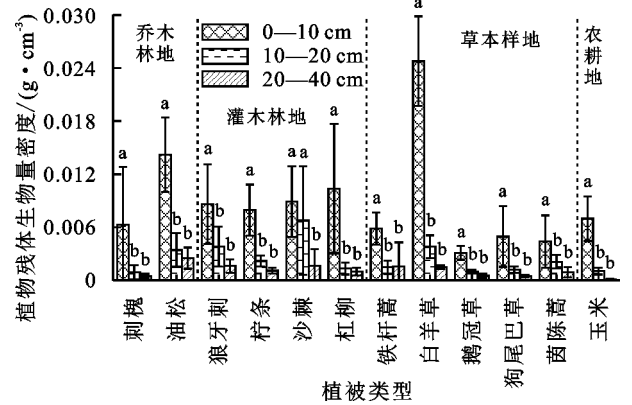


图 1 典型植被样地不同土层间植物残体生物量密度变化

表 2 不同土地利用类型各土层植物残体生物量变化

土地利用类型	单位:g			
	0—10 cm	10—20 cm	20—40 cm	总和
乔木林地	1.02Aa	0.22ABb	0.15Ab	1.39
灌木林地	0.90Aa	0.35Ab	0.13Ac	1.38
草本样地	0.86Aa	0.19ABb	0.10Ab	1.15
农耕地	0.70Ba	0.10Bb	0.01Bb	0.81

注:表中不同大写字母表示同一土层不同土地利用类型之间差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示同一土地利用类型不同土层之间差异显著($P<0.05$)。下同。

2.2 土壤物理性质

2.2.1 容重 受植被类型影响,不同土层土壤容重变化较大(1.01~1.42 g/cm³,图 2)。其中,0—10 cm 土层中白羊草样地土壤容重最大,为 1.24 g/cm³,是其他样地的 1.07~1.23 倍;10—20,20—40 cm 土层中玉米样地土壤容重较大,分别为 1.34,1.42 g/cm³,是其他植被样地的 1.03~1.26,1.05~1.23 倍。除刺槐和白羊草样地 0—10 cm 土层土壤容重略大于 10—20 cm 土层之外(分别大于 1.6%和 0.6%),土壤容

重总体随土层深度的增加而增大。其中,20—40 cm 土层土壤容重分别是 0—10,10—20 cm 土层的 1.01~1.25,1.00~1.14 倍。对于不同土地利用类型,在同一土层中农地土壤容重均大于乔灌草样地,但 0—10 cm 土层差异不显著。此外,乔灌草样地土壤容重在不同土层中均无显著差异;对于同一土地利用类型,0—10 cm 土层土壤容重均与 10—20,20—40 cm 土层存在显著差异($P<0.05$),而 10—20,20—40 cm 之间无显著差异。总体而言,农地平均容重最大,为 1.30 g/cm³,是乔灌草样地的 1.11,1.07,1.11 倍(表 3)。

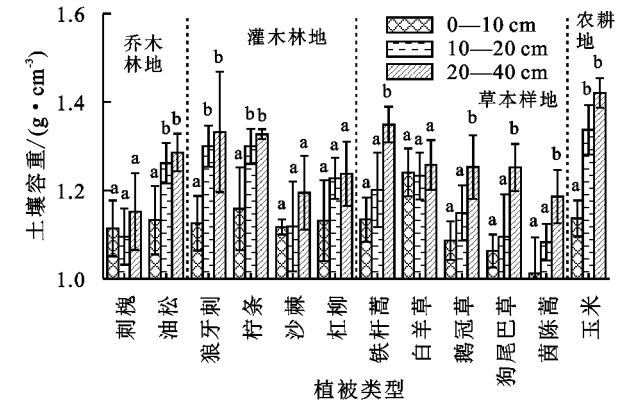


图 2 典型植被样地不同土层间土壤容重变化

表 3 不同土地利用类型各土层土壤容重变化

土地利用类型	单位:g/cm³			
	0—10 cm	10—20 cm	20—40 cm	平均值
乔木林地	1.12Aa	1.18Ab	1.22Ab	1.174
灌木林地	1.13Aa	1.24Ab	1.27Ab	1.214
草本样地	1.11Aa	1.15Aa	1.26Ab	1.173
农耕地	1.14Aa	1.34Bb	1.42Bb	1.298

2.2.2 毛管孔隙度 受植被类型、腐殖质、植物根系等因素影响,各样地土壤毛管孔隙度在不同土层中差异较大(46.97%~53.38%,图 3)。其中,狗尾草样地 0—10 cm 土层毛管孔隙度最大,为 53.38%,是其他

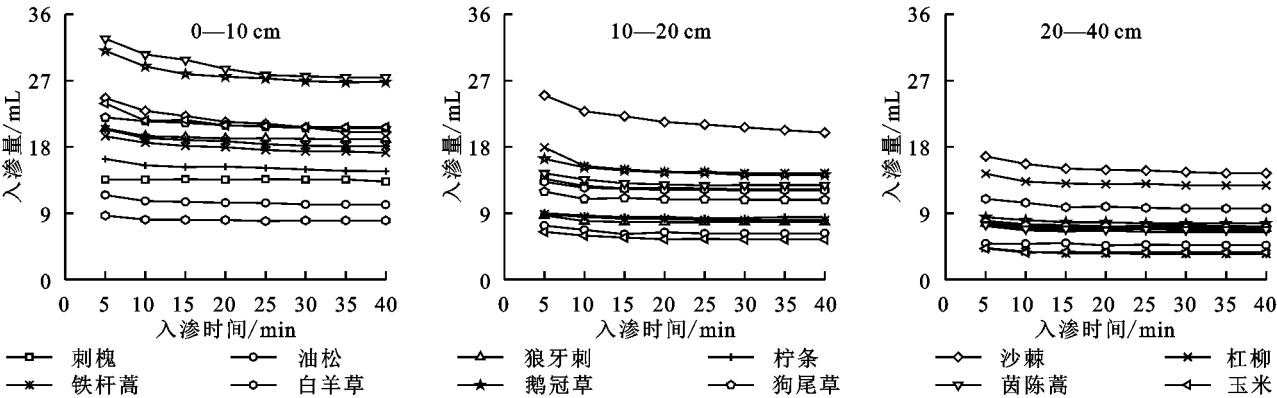


图 5 典型植被样地不同土层间土壤水分入渗过程

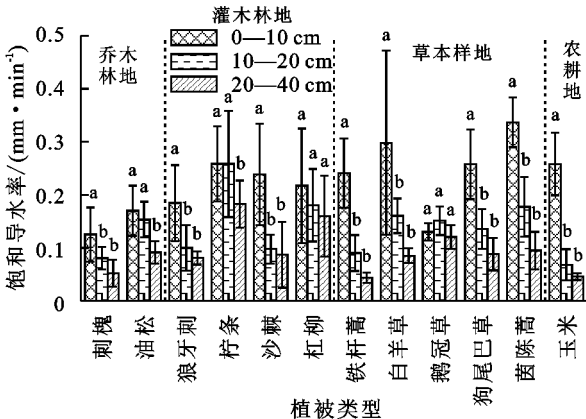


图 6 典型植被样地不同土层间土壤饱和导水率变化

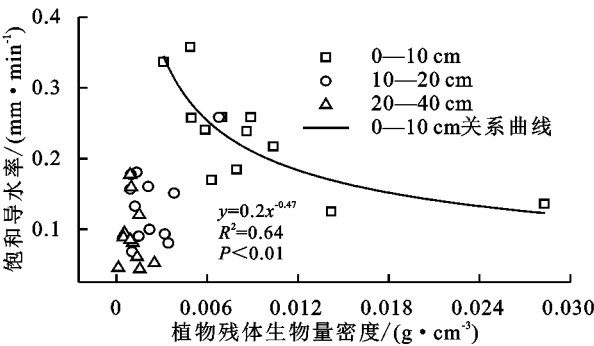
表 5 不同土层饱和导水率与土壤物理性质各因子之间相关系数

土层深度/cm	植物残体	土壤容重	毛管孔隙度	非毛管孔隙度
0—10	−0.339**	−0.570**	0.212	0.347**
10—20	0.064	−0.663**	0.398**	0.564**
20—40	0.233	−0.682**	0.556**	0.163

注：* * 表示在 0.01 水平上显著相关。

3 讨论

对于植物残体而言,受降解和淋溶作用的影响,



植物残体生物量密度随土层深度的增加而显著减少; 乔灌林地最大、草地次之、农地最小,这是因为乔灌植被冠层发达,残枝落叶等凋落物量相对更多,因而进入到土壤中的蓄积量大于草本植被^[16],而农地由于作物收获之后,将秸秆进行回收,进入到土壤中的植物残体很少。对于土壤容重,随土层深度的增加,土壤容重呈增加趋势,这主要是由于表层(0—10 cm)土壤植物残体及根系分布较多,土壤结构疏松多孔^[17],容重较低;此外,农地与乔灌草样地土壤容重在表层差别不大,而在较深土层(10—20, 20—40 cm)中显著高于乔灌草样地,这主要是由于黄土丘陵区农地翻耕深度通常为 10 cm 左右^[18],长期的农耕活动使得深层土壤形成了犁底层^[19],结构紧实,因此表层土壤容重较小,而深层较大。对于土壤毛管孔隙度及非毛管孔隙度,除个别样地随土层深度变化差异不显著外(如刺槐样地),其余样地均随土层深度的增加而显著减小,这是由于表层土壤容重低且植物残体和植被根系分布多,而较深土层土壤紧实、植物残体分布少,因而孔隙度较表层减小。

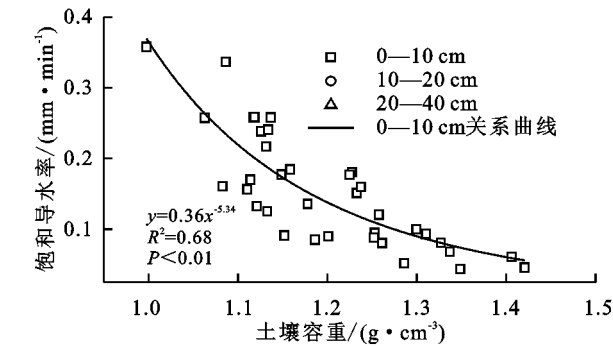


图 7 饱和导水率与植物残体生物量、土壤容重量化关系

植物残体生物量密度、土壤容重、毛管孔隙度及非毛管孔隙度是影响土壤导水性能的重要参数。由于植被类型的差异,各指标在不同土层间均存在显著差异,从而导致土壤导水性能发生了显著变化。表层土壤水分入渗量及饱和导水率均显著大于深层,与李胜龙等^[12]的研究结果一致,这主要与植物残体

及土壤物理性质有关。一方面,半降解的植物残体具有一定的斥水性,透水性较差,一定程度上阻碍了土壤水分入渗^[20],但也正是由于植物残体的存在,导致土壤容重降低,孔隙度增大,使得表层土壤入渗性能增强,饱和导水率较大,这也在一定程度说明容重及孔隙度对土壤入渗过程的影响强于植物残体

的阻碍作用;另一方面,表层土壤中大量分布的植物残体在某种程度上破坏了毛管孔隙的连续性,促进了非毛管孔隙发育,这也解释了饱和导水率虽与毛管孔隙度及非毛管孔隙度的增大总体呈幂函数增加,但表层饱和导水率与毛管孔隙度并无显著关系,而非毛管孔隙度显著相关。草地和农地表层其饱和导水率基本接近,但均显著大于乔灌林地,这主要是由于草本植物根系分布范围浅,土壤容重较小,孔隙度较大,而农地则是由农作措施导致表层土壤容重减

小所造成的。在较深土层,灌木林地饱和导水率最大,这是由于此层土壤中植物残体分布较少,对饱和导水率的影响作用很弱,此时土壤容重和孔隙度是影响饱和导水率的主导因素,相对而言灌木林地土壤容重较小、非毛管孔隙度最大,因而其饱和导水率最大。综合可知,植被凋落物经过腐烂之后形成植物残体,以及在植被生长过程中对不同土层深度土壤容重、孔隙度的影响,导致土壤水分入渗量及饱和导水率发生了显著差异。

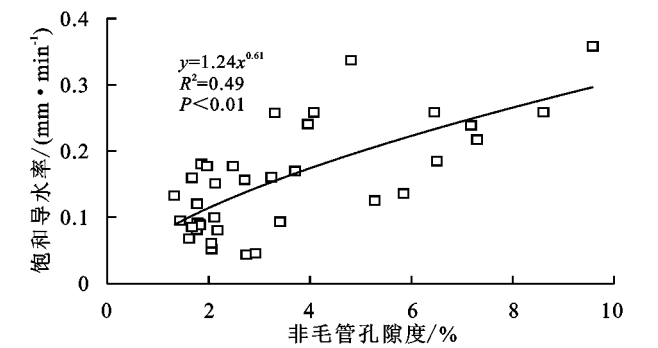
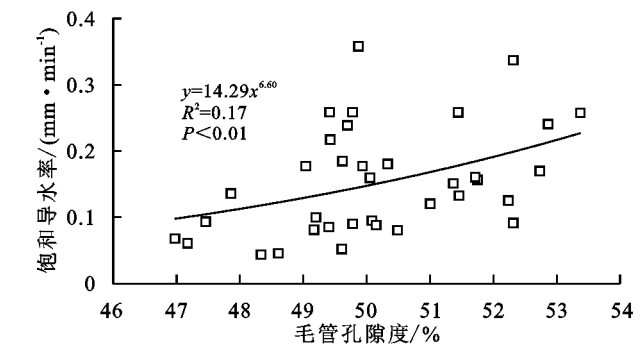


图 8 饱和导水率与毛管孔隙度、非毛管孔隙度量化关系

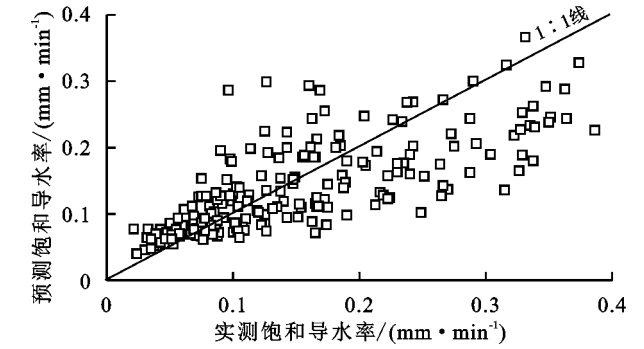


图 9 基于方程(1)土壤饱和导水率实测值与预测值比较

4 结论

受植被类型和土层深度的影响,植物残体生物量、土壤容重、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、饱和导水率存在显著差异。乔木林地其植物残体生物量总体高于灌木林地、草地和农耕地;农地受耕作犁底层的影响,其平均土壤容重较其他土地利用类型高;受植被根系及植物残体分布的影响,灌木林地具有较高的非毛管孔隙度和饱和导水率;整体上,毛管孔隙度在不同土地利用类型间差异不显著。随土层深度的增加,植物残体生物量、毛管孔隙度、非毛管孔隙度及饱和导水率均减小,且植物残体大都集中于表层土壤中(0—10 cm),占总植物残体生物量的 51.4%~85.7%;而土壤容重则随土层深度呈增加趋势。同时,植被类型及土壤物理性质的差异也在很大程度上影响着土壤的导水性能。总体而言,饱和导水率与植物残体及土壤物理性质显著相关,且土壤容重和非毛管孔隙度可预测土壤饱和导水率,即 $K_s = 0.6BD^{-4.717}NCP^{0.203}$ ($P < 0.01, R^2 = 0.63, NSE = 0.50$)。由于本研究未考

虑植被根系分布特征对土壤导水性能的影响,建议后面应注重这方面的研究,以期为深入理解植被恢复其水文效益提供理论基础。

参考文献:

[1] 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.

[2] 王贤,张洪江,程金花,等.重庆市四面山典型林分土壤饱和导水率研究[J].水土保持通报,2012,32(2):29-34.

[3] 傅子洹,王云强,安芷生.黄土区小流域土壤容重和饱和导水率的时空动态特征[J].农业工程学报,2015,31(13):128-134.

[4] Zhang G S, Chan K Y, Oates A, et al. Relationship between soil structure and runoff/soil loss after 24 years of conservation tillage[J]. Soil and Tillage Research, 2007,92(1/2):122-128.

[5] Franzluebbers A J. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth[J]. Soil and Tillage Research, 2002,66(2):197-205.

[6] 赵世伟,苏静,杨永辉,等.宁南黄土丘陵区植被恢复对土壤团聚体稳定性的影响[J].水土保持研究,2005,9(3):27-29.

[7] 纳磊,张建军,朱金兆,等.晋西黄土区不同土地利用类型坡面土壤饱和导水率研究[J].水土保持研究,2008,12(3):69-73.

[8] 易扬,信忠保,覃云斌,等.黄土丘陵区不同土地利用类型土壤水分物理性质研究[J].水土保持研究,2013,20(5):45-56.

- 动的响应:以渭河流域为例[J].北京师范大学学报(自然科学版),2017,53(4):472-478.
- [23] Zheng F L, Liu W Z, Li Z, et al. Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 377(1/2):35-42.
- [24] Zhan C S, Jiang S S, Sun F B, et al. Quantitative contribution of climate change and human activities to runoff changes in the Wei River basin, China[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18(8):3069-3077.
- [25] 张淑兰,王彦辉,于澎涛,等.人类活动对泾河流域径流时空变化的影响[J].干旱区资源与环境,2011,25(6):66-72.
- [26] 陶望雄,贾志峰,刘招,等.泾河张家山站径流及其控制流域降雨变化特征分析[J].长江科学院院报,2014,31(8):41-44.
- [27] 冉大川.泾河流域人类活动对地表径流量的影响分析[J].西北水资源与水工程,1998,2(1):34-38.
- [28] 齐清,王天明,寇晓军,等.泾河流域植被覆盖时空演变及其与降水的关系[J].植物生态学报,2009,31(8):246-253.
- [29] 李敏,张长印,王海燕.黄土高原水土保持治理阶段研究[J].中国水土保持,2019(2):1-4.
- [30] 王晓斌.泾河张家山水文站设立的考证[J].陕西水利,2016(6):7-10.
- [31] Monteith J L. Evaporation and environment. Symposia of the society for experimental biology[J]. *Journal of Water Resource and Protection*, 1965, 19:205-234.
- [32] 王文圣,丁晶,向红莲.小波分析在水文学中的应用研究及展望[J].水科学进展,2002,13(4):515-520.
- [33] Nakken M. Wavelet analysis of rainfall-runoff variability isolating climatic from anthropogenic patterns[J]. *Environmental Modelling and Software*, 1999, 14(4):283-295.
- [34] 黄强,孔波,樊晶晶.水文要素变异综合诊断[J].人民黄河,2016,38(10):18-23.
- [35] 夏库热·塔依尔,海米提·依米提,麦麦提吐尔逊·艾则孜,等.基于小波分析的开都河径流变化周期研究[J].水土保持研究,2014,21(1):142-146.
- [36] 吕翠美,吴泽宁,刘文立,等.伊河流域径流周期变化特征的小波分析[J].人民黄河,2007,29(5):26-28.
- [37] 任立良,张炜,李春红,等.中国北方地区人类活动对地表水资源的影响研究[J].河海大学学报(自然科学版),2001,29(4):13-18.
- (上接第181页)
- [9] 张川,陈洪松,张伟,等.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[J].应用生态学报,2014,25(6):1585-1591.
- [10] 廖凯华,徐绍辉,程桂福.大沽河流域土壤饱和导水率空间变异特征[J].土壤,2009,41(1):147-151.
- [11] 彭舜磊,由文辉,沈会涛.植被群落演替对土壤饱和导水率的影响[J].农业工程学报,2010,26(11):78-84.
- [12] 李胜龙,张海林,刘目兴,等.稻田—田埂过渡区土壤水分运动与保持特征[J].水土保持学报,2017,31(2):122-128.
- [13] Wang B, Zhang G H, Shi Y Y, et al. Effect of natural restoration time of abandoned farmland on soil detachment by overland flow in the Loess Plateau of China[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2013, 38(14):1725-1734.
- [14] 王毅荣.黄土高原植被生长期旱涝对全球气候变化响应[J].干旱区地理,2005,28(2):161-166.
- [15] 王国梁,刘国彬,党小虎.黄土丘陵区不同土地利用方式对土壤含水率的影响[J].农业工程学报,2009,25(2):31-35.
- [16] 栾莉莉,张光辉,孙龙,等.黄土高原区典型植被枯落物蓄积量空间变化特征[J].中国水土保持科学,2015,13(6):48-53.
- [17] 侯喜禄,白岗栓.黄土丘陵区森林保持水土效益及其机理的研究[J].水土保持研究,1996,3(2):98-103.
- [18] 夏积德,吴发启,周波.黄土高原丘陵沟壑区坡地耕作方式对土壤侵蚀的影响研究[J].水土保持学报,2016,30(4):64-67.
- [19] 杨思存,王成宝,霍琳,等.不同耕作措施对甘肃引黄灌区耕地土壤有机碳的影响[J].农业工程学报,2019,35(2):114-121.
- [20] 吕岩,仵磊,徐燕,等.有机质对草炭土物理力学性质影响的机理分析[J].岩土工程学报,2011,33(4):655-660.