

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^①

毛娜^{1, 2, 3}, 黄来明^{1, 3*}, 邵明安^{1, 2, 3, 4}

(1 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; 2 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; 3 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 4 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 土壤饱和导水率(K_s)是影响水、溶质运移过程和水文模型模拟精度的重要参数,了解坡面尺度下不同植被类型 K_s 的剖面分布与影响因素有助于更好地理解土壤水文过程及其调控机制。本研究通过测定典型黄土区坡面尺度不同植被类型下 12 个土壤剖面(0~200 cm)的 K_s 及土壤基本性质,分析了不同坡向间及同一坡向内随植被类型变化土壤 K_s 的剖面分布特征及其影响因素。结果表明:不同植被类型下土壤 K_s 首先随着土壤深度的增加而减小,而后呈增大趋势。东北坡林地、西坡草地和林地剖面上层(0~20 cm)的平均土壤 K_s ($K_{s-average}$)均显著高于剖面下层(20~200 cm) ($P<0.05$)。同一坡向内不同植被类型及不同坡向间相同植被类型 0~20 cm 土层的 $K_{s-average}$ 没有显著差异 ($P>0.05$);而由于土壤质地和有机质含量的差异,20~200 cm 土层的 $K_{s-average}$ 表现为同一坡向内东北坡草地显著高于林地 ($P<0.05$),不同坡向间东北坡草地和林地分别显著高于西坡草地和林地 ($P<0.05$)。六道沟小流域不同植被类型下土壤 K_s 与容重、黏粒含量、粉粒含量呈极显著负相关 ($P<0.001$),与毛管孔隙度、饱和含水量、砂粒以及有机质含量(西坡草地除外)呈显著正相关 ($P<0.05$)。影响六道沟小流域 K_s 剖面分布的因素可由土壤持水特性(49.36%)、质地(24.98%)和养分含量(13.92%) 3 个主成分贡献。本研究利用多元逐步回归分析获得了以容重、土壤质地和有机质为输入因子的土壤 K_s 传递函数 ($R^2 = 0.60 \sim 0.86$, $P<0.001$),可为典型黄土区坡面尺度土壤 K_s 的模拟和预测提供参考。

关键词: 饱和导水率;剖面分布;影响因素;植被类型;六道沟小流域

中图分类号: S152.7+2 文献标识码: A

土壤饱和导水率(K_s)反映了土壤入渗和渗漏性质,是影响水、溶质运移过程和水文模型模拟精度的重要参数^[1],对水土保持措施具有重要的指导意义^[2-3]。一般而言, K_s 受土壤容重^[4-5]、质地^[6]、碎石^[7-8]、有机质含量^[9]、大孔隙^[10-11]等土壤基本性质的影响,而土壤基本性质又易被土地利用类型^[12]、地形因素^[13]等改变,不同地区 K_s 的主控因素不同。已有许多学者对不同空间尺度下(例如流域^[14-16]、坡面^[17-18]、田块^[19-20]等)土壤 K_s 及影响因素进行了研究^[21-23],但是这些研究均重点关注土壤表层(0~20 cm) K_s 的水平空间分异规律,忽视了 K_s 随土壤深度的变异特征,深层(> 20 cm) K_s 剖面分布对研究土壤溶质迁移和水分运动具有重要的指导意义。Coquet 等^[24]通过对比农

耕地 3 个土壤剖面的 K_s ,发现 K_s 随土壤深度的变化趋势不同。姚淑霞等^[25]对不同沙漠化土壤 K_s 进行研究,发现潜在沙漠化和初步沙漠化的土壤 K_s 随土壤深度的变化分别呈抛物线状和指数状。而 Schwen 等^[26]指出林地 K_s 随着土壤深度的增加而增加。上述研究表明 K_s 随着土壤深度的增加其变化表现出明显的差异性,为深入理解 K_s 的剖面分布及区域水文过程模拟奠定了基础。

黄土高原位于我国西北干旱与半干旱地区,具有深厚的黄土覆盖、复杂的地形地貌^[27]、强烈的水土流失和脆弱的生态环境^[28-29]。该地区土壤水分主要来自有限降雨的自然补给,而土壤水分又是该区植物生长和植被恢复的主要限制因子,如何提高黄土对该区

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41601221),国家重点研发计划专项项目(2016YFC0501605)和中国科学院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(A314021402-1602)资助。

* 通讯作者(huanglm@igsrr.ac.cn)

作者简介:毛娜(1993—),女,陕西商洛人,硕士研究生,主要从事土壤物理研究。E-mail: maona0110@163.com

有限降水资源的蓄存和利用效率是当前黄土高原植被建设和生态恢复面临的重要科学问题。了解 K_s 的剖面分布、影响因素及其在不同空间尺度上的分异规律有助于更好地理解黄土区水文过程。然而,目前该地区关于 K_s 的研究主要集中在时空异质性方面^[15, 30-33],对于坡面尺度下不同植被类型 K_s 的剖面分布及影响因素研究较少。基于此,本研究选取黄土高原六道沟小流域的典型坡面,探讨不同坡向间及同一坡向内随植被类型变化土壤剖面(0~200 cm)的 K_s 及影响因素,以期为黄土高原植被恢复及流域水文模型的构建提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究在中国科学院水利部水土保持研究所神木侵蚀与环境试验站进行。试验站位于陕西省神木县六道沟小流域(110°21' ~ 110°23' E, 38°46' ~ 38°51' N),海拔高度为 1 094 ~ 1 273 m,流域面积 6.9 km²。六道沟小流域北依长城,地处毛乌素沙漠边缘地带,属于黄土高原水蚀风蚀交错带的强烈侵蚀中心。该流域气候类型为半干旱大陆性季风气候,年均气温 8.4℃,平均最低气温(1月)和最高气温(7月)分别为-9.7℃和 23.7℃;年平均降水量为 437 mm,年际和年内分布不均,年内降水主要集中在 6—9 月份(约占 77.4%),且多以暴雨形式出现。流域内大部分天然植被已遭破坏,为了防止土壤侵蚀和生态环境的进一步恶化,该区域实行了退耕还林草措施,除了小面积的农地,大部分土地类型为草地和林地。林草地可以有效提高表层土壤入渗率,显著减少坡面产流量和产沙量^[34]。进一步探究不同植被类型土壤 K_s 的剖面分布特征,可为更好地理解坡面尺度垂直方向上的水文过程提供理论基础。该区草本植物主要有长芒草(*Stipa bungeana*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)等,灌木主要有柠条(*Caragana korshinskii kom*)和沙柳(*Salix psammophila*)等,乔木主要有山杏(*Prunus armeniaca*)和小叶杨(*Populus simonii*)等。

1.2 样品采集与分析

2016年4月,在考察了神木六道沟小流域的地形、地貌和植被类型后,选取了东北朝向和西朝向的样地,并基于不同植被类型,在两个样地中分别选取了6个代表性土壤剖面(NE-P1 ~ NE-P6 和 W-P1 ~ W-P6,图 1)。采样点植被类型包括草地和林地,草本植物类型主要有苜蓿、长芒草、草木樨、达乌里胡

枝子、铁杆蒿和冰草等,林地主要植物类型为山杏和柠条。土壤剖面深度为 2 m,分别采集剖面不同土层原状土壤和扰动土壤样品,其中 0~1 m 土层采样间隔为 10 cm,1~2 m 土层采样间隔为 20 cm。

原状土用于测定土壤饱和含水量、饱和导水率、毛管孔隙度、总孔隙度和容重。饱和含水量和孔隙度用《森林土壤水分-物理性质的测定》(LY/T 1215—1999)^[35]提供的吸水法测定;饱和导水率用双环刀-定水头法测定(结果换算为 10℃);土壤容重用环刀法测定。

扰动土壤样品带回实验室自然风干,挑去枯枝落叶、根系和砾石,磨碎后过 2 mm 和 0.25 mm 筛,分别用于测定土壤颗粒组成和有机质含量。土壤颗粒组成(以体积分数计)采用 MS 2000 激光粒度仪测定,土壤有机质采用重铬酸钾氧化-外加加热法测定。上述扰动土样基本性质测定方法参照《土壤农化分析》^[36]。

1.3 数据处理

采用 SPSS 20.0 软件进行统计分析、相关性分析、主成分分析、正态检验(K-S)和多元逐步回归分析,采用 Origin Pro 9.0 数学软件绘图。

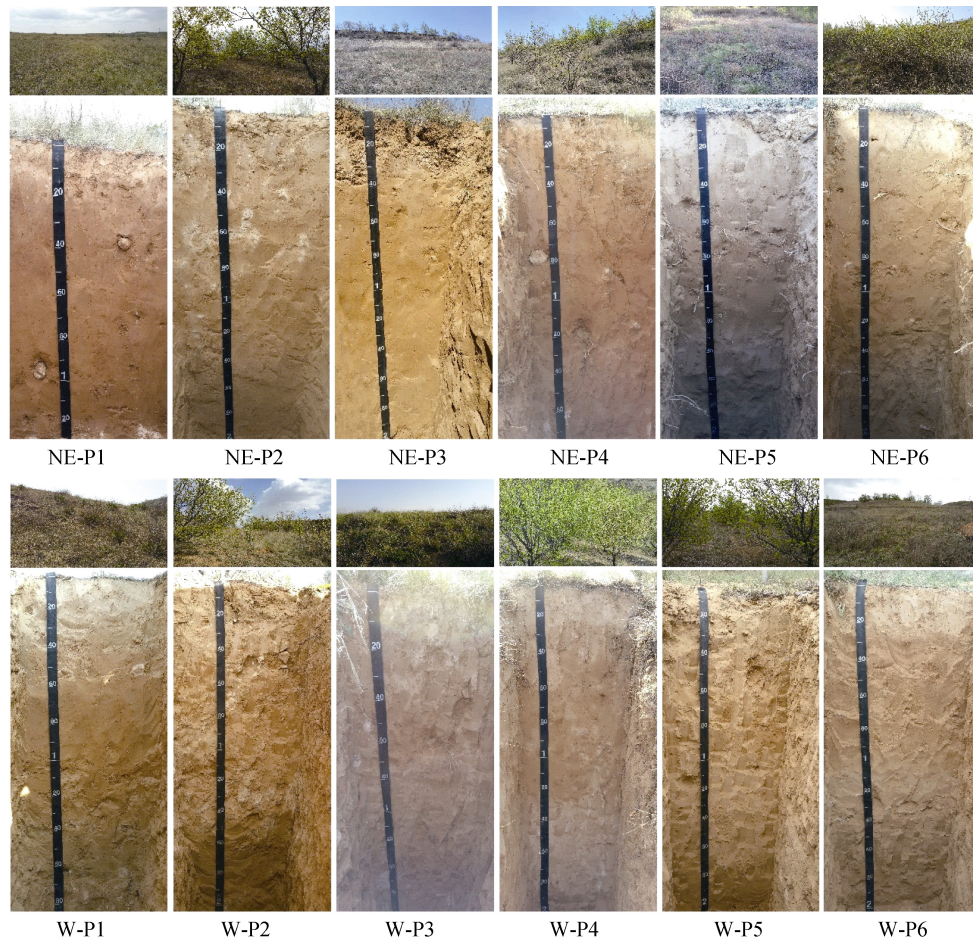
2 结果与讨论

2.1 不同植被类型土壤基本物理性质剖面分布特征

不同植被类型土壤基本物理性质剖面分布特征如图 2 所示。容重是土壤最基本的物理性质,能够综合反映土壤松紧度及水土流失状况^[37]。研究区不同植被类型土壤容重表现为在 0~100 cm 土层内随土层深度增加而快速增加,100 cm 土层以下呈波动性分布(图 2A),这主要是因为随着土层深度的增加,植物根系^[36]和土壤有机质逐层减少(图 2H);此外,随着土壤剖面深度的增加,下层土体由于上层土壤的压力而变得更加坚实^[38]。不同植被类型下土壤容重平均值接近($P>0.05$),变化范围为 1.49~1.53 g/cm³。

不同植被类型土壤毛管孔隙度、总孔隙度及饱和含水量在 0~20 cm 土层较高,20 cm 以下土层波动变化,总体上均随着土壤深度的增加而减小(图 2B, 2C, 2D)。这是因为土壤表层容重较小,土体疏松,孔隙度较高,土壤持水能力强^[38]。

不同植被类型土壤均以粉粒为主(42.52%~60.34%),砂粒(19.91%~41.22%)次之,黏粒含量最低(12.27%~21.07%)。土壤黏粒含量首先随着土壤剖面深度的增加而增加,在剖面中下部(70~120 cm)达到最大值(13.80%~28.43%),而后又随着土壤剖面深度增加而减小(图 2E);粉粒含量随剖面深度变化幅度



(NE 为东北朝向, 其中 NE-P1、NE-P3、NE-P5 为草地, NE-P2、NE-P4、NE-P6 为林地; W 为西朝向, 其中 W-P1、W-P3、W-P6 为草地, W-P2、W-P4、W-P5 为林地)

图 1 土壤样品采集点景观及剖面照

Fig. 1 Landscapes and soil profiles of sampling sites

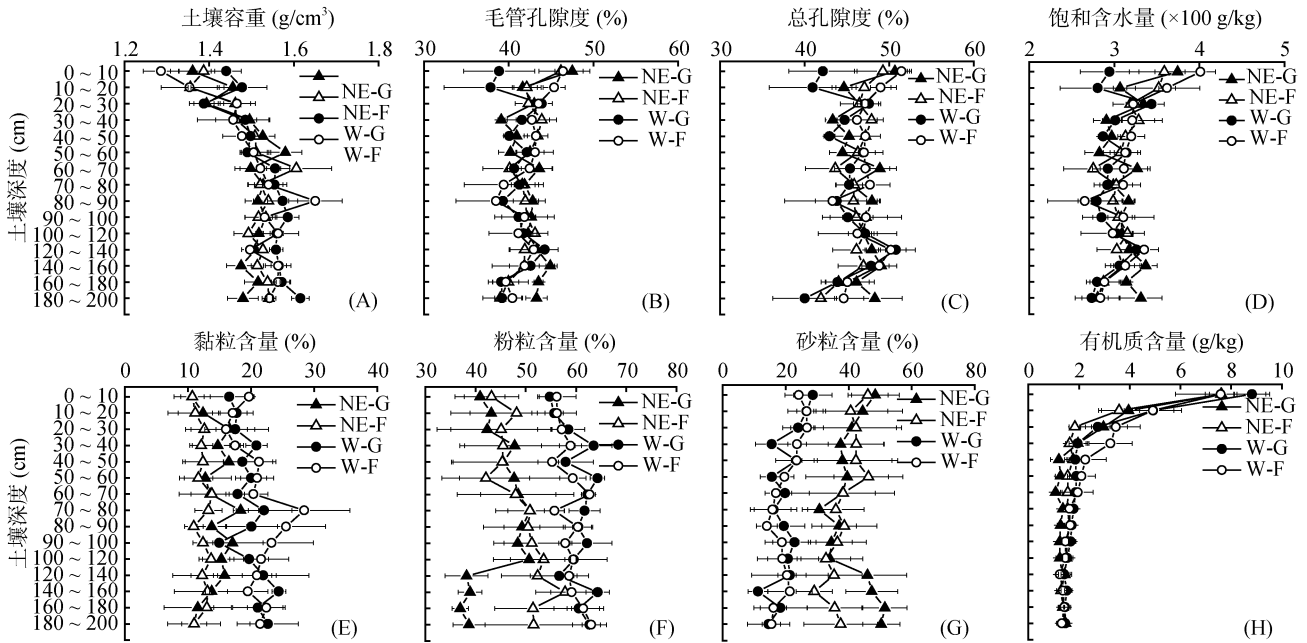
较小(图 2F);而砂粒含量表现为随着剖面深度的增加而减小(图 2G)。土壤黏粒由于其粒径较小,在土壤剖面中容易随着降水入渗向剖面深处运移;而砂粒的粒径较大,向剖面深处运移的能力较小^[39]。不同坡向间,东北坡草地和林地土壤剖面黏粒(14.26%和 12.27%)和粉粒平均含量(44.52%和 49.10%)分别显著低于西坡土壤黏粒(19.74%和 21.07%)和粉粒平均含量(60.34%和 58.75%)($P < 0.05$),而东北坡草地和林地土壤剖面砂粒平均含量(41.22%和 38.63%)显著高于西坡草地和林地平均砂粒含量(19.91%和 20.17%)($P < 0.05$),这说明坡向对土壤质地的剖面分布有显著影响。

不同植被类型土壤有机质含量在 0~50 cm 土层内随土层深度增加而显著降低,50 cm 土层以下基本趋于稳定(图 2H)。东北坡草地和林地以及西坡草地和林地 0~50 cm 土层有机质平均含量(3.54、3.28、4.06、4.29 g/kg)分别是 50~200 cm 土层有机质平均

含量(1.29、1.49、1.63、1.56 g/kg)的 2.75 倍、2.21 倍、2.49 倍、2.75 倍,剖面上层土壤有机质含量较高主要归因于地表凋落物、根系分泌物以及微生物和土壤动物生物量的输入^[40-41]。

2.2 不同植被类型土壤饱和和导水率剖面分布特征

研究区不同植被类型土壤饱和和导水率平均值($K_{s-average}$)首先随着土壤深度的增加而减小,而后呈增大趋势(图 3A)。东北坡草地(NE-G)和林地(NE-F)的 $K_{s-average}$ 最大值(8.15 cm/h 和 11.62 cm/h)以及西坡草地(W-G)和林地(W-F) $K_{s-average}$ 最大值(7.76 cm/h 和 12.74 cm/h)均出现在剖面上层(0~20 cm),剖面上层 $K_{s-average}$ 较高主要归因于高度发育的植物根系以及强烈的土壤生物活动形成的低容重、高孔隙度的土壤结构^[42];而 NE-G 和 NE-F 的 $K_{s-average}$ 最小值(2.59 cm/h 和 1.35 cm/h)以及 W-G 和 W-F 的 $K_{s-average}$ 最小值(0.73 cm/h 和 0.90 cm/h)均出现在剖面中下部(70~120 cm),这是由于剖面上部土壤黏粒随水分的向下运移,堵塞了



(图中 NE 和 W 分别代表东北坡和西坡, G 和 F 分别代表草地和林地, 即 NE-G 和 NE-F、W-G 和 W-F 分别是东北坡和西坡的草地和林地)

图 2 六道沟小流域不同植被类型土壤基本物理性质的剖面分布

Fig. 2 Profile distribution of soil basic properties under different vegetations in Liudaogou watershed

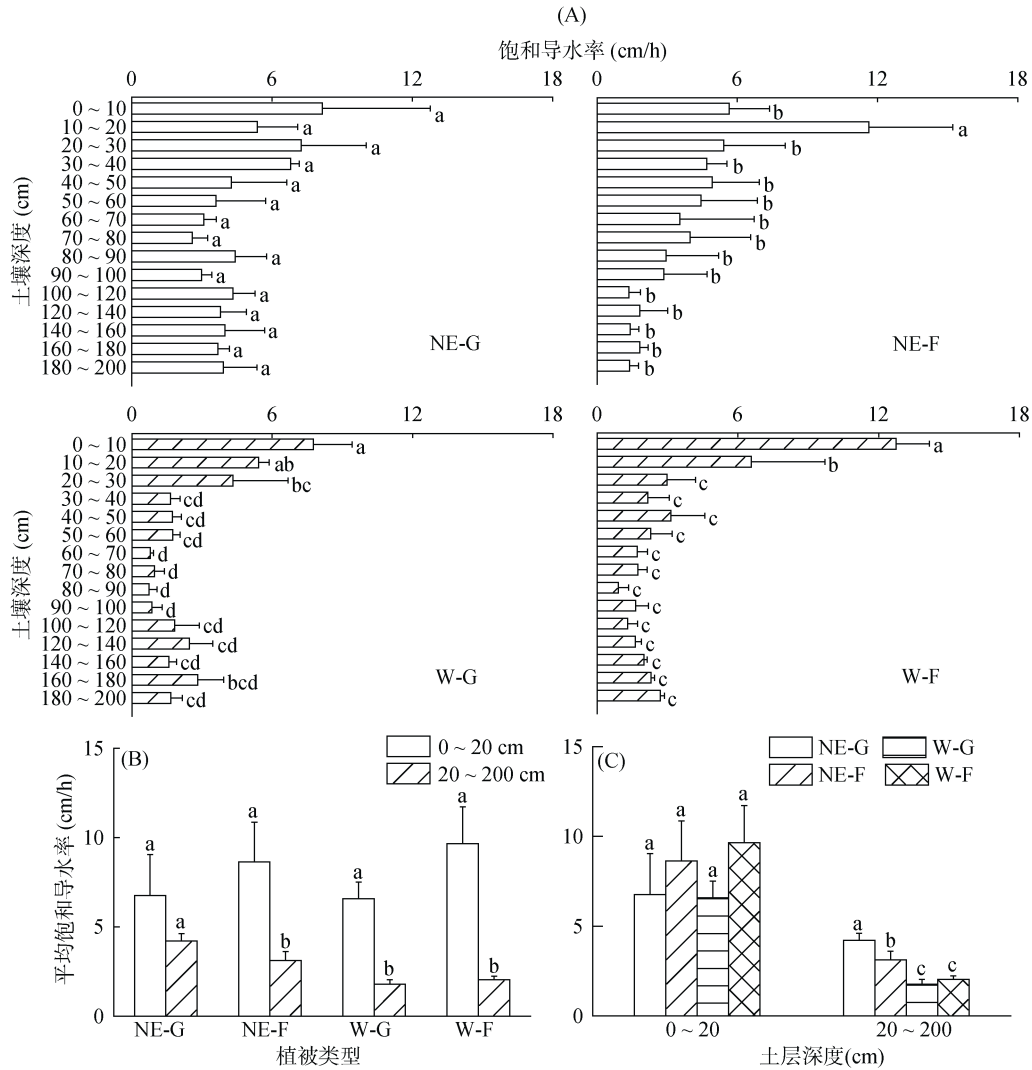
剖面中下部的透水孔隙,这与土壤黏粒的剖面分布特征一致(图 2E)。NE-F、W-G 和 W-F 剖面上层(0~20 cm)的 $K_{s-average}$ (8.64、6.59、9.66 cm/h)显著高于剖面下层(20~200 cm)的 $K_{s-average}$ (3.13、1.78、2.04 cm/h)($P<0.05$)(图 3B)。同一坡向内不同植被类型及不同坡向间相同植被类型 0~20 cm 土层的 $K_{s-average}$ 没有显著差异,而 20~200 cm 土层的 $K_{s-average}$ 表现为同一坡向内东北坡草地显著高于林地($P<0.05$),不同坡向间东北坡草地和林地分别显著高于西坡草地和林地($P<0.05$),这是因为与 W-G 和 W-F 相比,NE-G 和 NE-F 的 20~200 cm 土层黏粒、粉粒平均含量更低,而砂粒含量和有机质含量更高($P<0.05$)。由此说明,不同坡向和植被类型影响 K_s 剖面分布。

总之,研究区土壤具有相对较高的 K_s ,表层 $K_{s-average}$ 为 7.91 cm/h,而下层相对较低,为 2.79 cm/h,剖面整体 $K_{s-average}$ (2.42~4.55 cm/h)高于该流域农田 $K_{s-average}$ (0.09~0.22 cm/h)^[43],说明植被恢复可以有效提高土壤 K_s ;此外,研究区土壤 K_s 与王东沟流域 K_s (3.98~5.54 cm/h)^[42]接近,但是高于黄土高原中部子午岭地区的测定值(0.30~2.28 cm/h)^[23]。黄土高原地区土壤 K_s 差异较大主要是因为该区土壤质地、植被分布、地形等因素的空间变异性较大^[32, 45]。

2.3 土壤基本性质对土壤饱和导水率的影响

土壤容重、质地、孔隙度和有机质含量等基本性

质是影响土壤 K_s 大小及其剖面分布的重要因素。因此,本文选取了土壤颗粒组成(黏粒、粉粒和砂粒含量)、容重、饱和含水量、孔隙度(毛管孔隙和总孔隙度)和有机质含量共 8 个土壤基本性质参数与 K_s 进行相关分析。从图 4 可以看出,不同植被类型 K_s 与土壤容重、黏粒和粉粒含量呈显著负相关($r = 0.14 \sim 0.77, P<0.05$)。研究表明,土壤容重较小时,土体疏松,孔隙度大,土壤导水能力强;而土壤容重较大,黏粒和粉粒等细土壤颗粒含量高时,土壤板结,孔隙度小,使土壤 K_s 越小^[41]。此外,黏粒和粉粒由于其粒径较小,在土壤剖面中容易随着降水入渗向剖面深处运移,从而造成了土壤容重、孔隙度等性质的差异,进一步会影响 K_s 的剖面分布^[41]。 K_s 与砂粒含量、毛管孔隙度和饱和含水量呈显著正相关关系($r = 0.18 \sim 0.90, P<0.05$)。土壤砂粒有利于大孔隙度的形成,从而促进水分流动, K_s 随之增大。东北坡草地和林地以及西坡林地 K_s 与有机质含量呈显著正相关关系,而西坡草地 K_s 与有机质含量呈负相关关系($P<0.05$)。土壤有机质是土壤结构形成和稳定作用的核心物质,通过改善土壤结构、土壤胶体状况等影响 K_s ,起到调控水分运动的功能^[44-47]。土壤 K_s 随着有机质含量的变化是向下开口的抛物线^[23],这是因为适宜的有机质含量可以降低土壤容重,增加土壤孔隙,从而提高土壤导水性能;但有机质含量过高时,土壤结构改



(图中误差线表示标准误差；图 3A 中小写字母不同表示 0~200 cm 剖面各个土层 K_s 的差异显著 ($P < 0.05$)；图 3B 中小写字母不同表示同一坡向内林地或草地不同土层间 K_s 的差异显著 ($P < 0.05$)；图 3C 中小写字母不同表示同一土层深度不同植被类型 K_s 的差异显著 ($P < 0.05$)

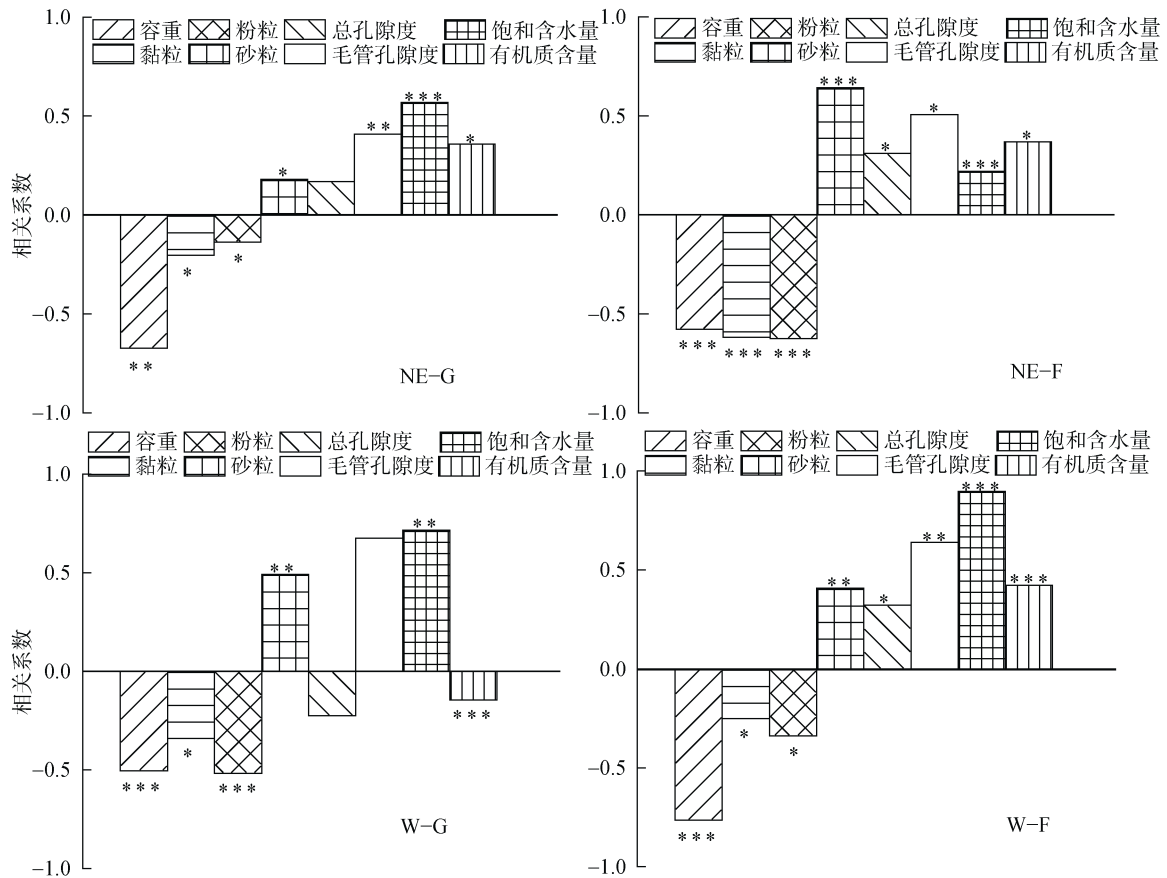
图 3 六道沟小流域不同植被类型土壤 K_s 剖面分布特征

Fig. 3 Profile distribution of K_s under different vegetations in Liudaogou watershed

善对导水性能的促进作用小于有机碳吸附作用的抑制能力，阻碍或延缓土壤水的入渗速度，此时 K_s 随着有机质含量的增加而降低。但是，本研究中西坡草地土壤有机质平均含量为 2.26 g/kg，与其他植被类型下土壤有机质平均含量(2.04 ~ 2.47 g/kg)无显著差异，所以西坡草地有机质含量与 K_s 的负相关关系机理还有待于进一步研究。

综上所述，不同植被类型土壤容重、质地、孔隙度和有机质含量均对 K_s 的大小及剖面分布有影响，又因为各土壤基本性质之间表现出极强的相关性^[45, 48-49]，所以根据相关系数无法确定不同因素对 K_s 的相对贡献。因此，为了确定 K_s 的主控因子，利用所有数据点($N = 180$)进行 K_s 影响因素的主成分分析。

通过主成分分析发现，影响土壤 K_s 的 8 个变量的全部信息可由 3 个主成分反映 88.26%，即对前 3 个主成分进行分析能够反映全部数据的大部分信息(表 1)。第一主成分的贡献率为 49.36%，特征主要表现在土壤容重、毛管孔隙度、总孔隙度和饱和含水量上，其载荷分别为 -0.78、-0.85、0.67 和 0.88，这表明第一主成分是以土壤持水特性为主要特征向量。第二主成分的贡献率为 14.98%，在土壤黏粒、粉粒和砂粒含量上有较高的载荷，即第二主成分以土壤质地为主要特征向量。第三主成分的贡献率为 13.92%，主要在有机质含量上有较好的载荷，而有机质含量是土壤养分供应能力的重要指标，所以第三主成分主要表征了土壤养分特征对 K_s 的影响。上述结果表明影



(图中***表示显著性水平为 $P < 0.001$ ，**表示显著性水平为 $P < 0.01$ ，*表示显著性水平为 $P < 0.05$)

图 4 六道沟小流域不同植被类型土壤 K_s 与土壤基本性质相关系数分布

Fig. 4 Pearson correlation coefficients between K_s and soil properties under different vegetations in Liudaogou watershed

表 1 土壤 K_s 影响因素主成分分析 ($N = 180$)

Table 1 Principle component analysis of controlling factors on K_s

项目	第一主成分 PC1	第二主成分 PC2	第三主成分 PC3
特征值	3.95	1.99	1.11
贡献率(%)	49.36	24.98	13.92
累积贡献率(%)	49.36	74.34	88.26
容重(g/kg)	-0.78	-0.35	0.35
黏粒(%)	-0.68	0.55	0.04
粉粒(%)	-0.59	0.71	0.08
砂粒(%)	0.69	-0.72	-0.07
毛管孔隙度(%)	0.85	0.31	0.27
有机质(g/kg)	0.34	0.41	-0.78
总孔隙度(%)	0.67	0.36	0.43
饱和含水量(g/kg)	0.88	0.42	0.09

响六道沟 K_s 剖面分布的因素可以由土壤持水特性、质地和养分含量 3 个主成分反映。事实上，不同地区

土壤 K_s 的影响因素存在差异。李孝良等^[50]研究表明土壤孔隙度、质地和酸碱度是影响西南喀斯特地区土壤 K_s 的主要因素，吴华山等^[51]研究表明土壤容重、团聚度、结构系数和有机质是影响太湖地区水稻土 K_s 的主要因素，而方堃等^[48]研究表明土壤容重是影响红壤地区农田土壤 K_s 的最主要因素。

基于上述结果与分析，综合所有影响因素，本研究利用多元逐步回归分析法建立土壤剖面 K_s 的传递函数。在函数建立之前，对 K_s 进行对数转换使其符合正态分布，最终获得了以容重、土壤质地和有机质含量为输入因子的土壤 K_s 传递函数(表 2, $R^2 = 0.60 \sim 0.86$, $P < 0.001$)，可为典型黄土区坡面尺度土壤 K_s 的模拟和预测提供参考。此外，姚荣江等^[52]也用土壤容重、土壤质地和有机质含量对滩涂围垦农田土壤 K_s 进行拟合，其拟合结果也较为理想。

3 结论

不同植被类型下土壤 K_s 首先随着土壤深度的增加而减小，而后呈增大趋势。东北坡林地、西坡草地

表 2 六道沟流域不同植被类型土壤 K_s 传递函数拟合表
Table 2 Pedotransfer functions of K_s under different vegetations in Liudaogou watershed

植被类型	传递函数表达式	R^2	显著性水平
NE-G	$\ln(K_s) = 15.10 - 0.64\ln(\text{Clay}) - 0.76\ln(\text{Sand}) - 0.17\ln(\text{SOM}) - 6.25\text{BD}$	0.72	$P < 0.001$
NE-F	$\ln(K_s) = 2.99 - 0.16\text{Clay} - 0.08\text{Sand} - 0.17\text{SOM}^2 - 6.25\text{BD}^2$	0.86	$P < 0.001$
W-G	$\ln(K_s) = 23.00 + 0.20\ln(\text{Clay}) - 4.50\ln(\text{Silt}) + 0.56\ln(\text{SOM}) - 3.33\text{BD}$	0.60	$P < 0.001$
W-F	$\ln(K_s) = 4.39 - 3.85\ln(\text{BD}) - 0.06\ln(\text{Sand}) + 0.19\text{SOM} - 111.04\text{TP}^{-1}$	0.81	$P < 0.001$

注： K_s 为饱和导水率(cm/h)；BD 为土壤容重(g/cm³)；TP 为总孔隙度(%)；Clay 为黏粒含量(%)；Silt 为粉粒含量(%)；Sand 为砂粒含量(%)；SOM 为土壤有机质含量(g/kg)。

和林地剖面上层(0 ~ 20 cm)的平均土壤 $K_s(K_{s\text{-average}})$ 均显著高于剖面下层(20 ~ 200 cm) ($P < 0.05$)。同一坡向不同植被类型及不同坡向间相同植被类型 0 ~ 20 cm 土层的 $K_{s\text{-average}}$ 没有显著差异, 而由于土壤质地和有机质含量的差异, 20 ~ 200 cm 土层的 $K_{s\text{-average}}$ 表现为同一坡向内东北坡草地显著高于林地 ($P < 0.05$), 不同坡向间东北坡林地和草地分别显著高于西坡林地和草地 ($P < 0.05$)。六道沟小流域不同植被类型下土壤 K_s 与土壤容重、黏粒含量、粉粒含量极显著负相关 ($P < 0.001$), 与毛管孔隙度、饱和含水量、砂粒以及有机质含量(西坡草地除外)显著正相关 ($P < 0.05$)。影响六道沟小流域 K_s 的因素可由土壤持水特性(49.36%)、质地(24.98%)和养分含量(13.92%) 3 个主成分贡献。本研究利用多元逐步回归分析获得了以容重、土壤质地和有机质为输入因子的土壤 K_s 传递函数 ($R^2 = 0.60 \sim 0.86$, $P < 0.001$), 可为典型黄土区坡面尺度土壤 K_s 的模拟和预测提供参考。

参考文献：

- [1] 廖凯华, 徐绍辉, 吴吉春, 等. 土壤饱和导水率空间预测的不确定性分析[J]. 水科学进展, 2012, 23(2): 200-205
- [2] Fodor N, Sandor R, Orfanus T, et al. Evaluation method dependency of measured saturated hydraulic conductivity[J]. Geoderma, 2015, 165(1): 60-68
- [3] Wang T J, Istanbuluoglu E, Wedin D, et al. Impacts of revegetation on the temporal evolution of soil saturated hydraulic conductivity in a vegetated sand dune area[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(11): 1-10
- [4] 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
- [5] Pachepsky Y, Park Y. Saturated hydraulic conductivity of US soils grouped according to textural class and bulk density[J]. Soil Science Society of America Journal, 2017, 79(4): 1094-1100
- [6] 迟春明, 王志春. 沙粒对碱土饱和导水率和盐分淋洗的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1): 99-102
- [7] Novak V, Kňava K, Šimůnek J. Determining the influence of stones on hydraulic conductivity of saturated soils using numerical method[J]. Geoderma, 2011, 161(3): 177-181
- [8] 周蓓蓓, 邵明安. 土石混合介质饱和导水率的研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 62-66
- [9] Lado M, Paz A, Benhur M. Organic matter and aggregate-size interactions in saturated hydraulic conductivity[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(1): 234-242
- [10] Wallage Z E, Holden J. Near-surface macropore flow and saturated hydraulic conductivity in drained and restored blanket peatlands[J]. Soil Use & Management, 2011, 27(2): 247-254
- [11] 秦耀东, 胡克林. 大孔隙对农田耕作层饱和导水率的影响[J]. 水科学进展, 1998, 9(2): 107-111
- [12] Kelishadi H, Mosaddeghi M R, Hajabbasi M A, et al. Near-saturated soil hydraulic properties as influenced by land use management systems in Koohrang region of central Zagros, Iran[J]. Geoderma, 2014, 213(1): 426-434
- [13] Wang T J, Zlotnik V, Wedin D A, et al. Spatial trends in saturated hydraulic conductivity of vegetated dunes in the Nebraska Sand Hills: Effects of depth and topography[J]. Journal of Hydrology, 2008, 349(1/2): 88-97
- [14] Fu T G, Chen H S, 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
- [15] 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
- [16] 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
- [17] 傅子洵, 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
- [18] Lewis C, Albertson J D, Xu X L, et al. Spatial variability of hydraulic conductivity and bulk density along a blanket peatland hillslope[J]. Hydrological Processes, 2012, 26(10): 1527-1537
- [19] Papanicolaou T, Elhakeem M, Wilson C G, et al. Spatial variability of saturated hydraulic conductivity at the hillslope scale: Understanding the role of land management and erosional effect[J]. Geoderma, 2015, 243/244(243): 58-68

- [20] Gwenzi W, Hinz C, Holmes K W, et al. Field-scale spatial variability of saturated hydraulic conductivity on a recently constructed artificial ecosystem[J]. *Geoderma*, 2011, 166(1): 43–56
- [21] Rienzner M, Gandolfi C. Investigation of spatial and temporal variability of saturated soil hydraulic conductivity at the field-scale[J]. *Soil & Tillage Research*, 2014, 135: 28–40
- [22] 白一茹, 王幼奇, 王菲, 等. 压砂地土壤导水特性空间格局及影响因子[J]. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(4): 55–61
- [23] 梁向锋, 赵世伟, 张扬, 等. 子午岭植被恢复对土壤饱和和导水率的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29(2): 636–642
- [24] Coquet Y, Vachier P, Labat C. Vertical variation of near-saturated hydraulic conductivity in three soil profiles[J]. *Geoderma*, 2005, 126(3/4): 181–191
- [25] 姚淑霞, 赵传成, 张铜会. 科尔沁不同沙地土壤饱和和导水率比较研究[J]. *土壤学报*, 2013, 50(3): 469–477
- [26] Schwen A, Zimmermann M, Bodner G. Vertical variations of soil hydraulic properties within two soil profiles and its relevance for soil water simulations[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 516(516): 169–181
- [27] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 7–12
- [28] Fares A, Kumar A A, Nkedi-kizza P, et al. Estimation of soil hydraulic properties of a sandy soil using capacitance probes and Guelph permeameter[J]. *Soil Science*, 2000, 165(10): 768–777
- [29] Chen L C, Wei W, Fu B J, et al. Soil and water conservation on the Loess Plateau in China: Review and perspective[J]. *Progress in Physical Geography*, 2007, 31(4): 389–403
- [30] 郑纪勇, 邵明安, 张兴昌. 黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(3): 53–56
- [31] Hu W, Shao M A, Si B C. Seasonal changes in surface bulk density and saturated hydraulic conductivity of natural landscapes[J]. *European Journal of Soil Science*, 2012, 63(6): 820–830
- [32] Zhou B B, Shao M A, Shao H B. Effects of rock fragments on water movement and solute transport in a Loess Plateau soil[J]. *Comptes Rendus-Géoscience*, 2009, 341(6): 462–472
- [33] 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
- [34] 于国强, 李占斌, 李鹏, 等. 不同植被类型的坡面径流侵蚀产沙试验研究[J]. *水科学进展*, 2010, 21(5): 593–599
- [35] 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 1215—1999[S]. 北京: 标准出版社, 1999
- [36] 史瑞和, 鲍士旦, 秦怀英. 土壤农化分析[M]. 北京: 农业出版社, 1981
- [37] 董浩, 陈雨海, 周勋波. 灌溉和种植方式对冬小麦耗水特性及干物质生产的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(7): 1871–1878
- [38] 张莉, 吴斌, 丁国栋, 等. 毛乌素沙地沙柳与柠条根系分布特征对比[J]. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(3): 158–161
- [39] Tranter G, Minasny B, Mcbratney A B, et al. Building and testing conceptual and empirical models for predicting soil bulk density[J]. *Soil Use & Management*, 2007, 23(4): 437–443
- [40] 董炜华, 李晓强, 宋扬. 土壤动物在土壤有机质形成中的作用[J]. *土壤*, 2016, 48(2): 211–218
- [41] 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
- [42] Zhang F, Wang X J, Guo T W, et al. Soil organic and inorganic carbon in the loess profiles of Lanzhou area: Implications of deep soils[J]. *Catena*, 2015, 126: 68–74
- [43] 付同刚, 陈洪松, 王克林. 喀斯特小流域土壤饱和和导水率垂直分布特征[J]. *土壤学报*, 2015, 52(3): 538–546
- [44] 刘春利, 邵明安. 黄土高原六道沟流域不同植被类型下土壤水力特性及其对土壤水分的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(11): 2400–2407
- [45] 李志, 刘文兆, 王秋贤. 黄土塬区不同地形部位和植被类型方式对土壤物理性质的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(6): 1303–1308
- [46] Li Y Y, Shao M A. Change of soil physical properties under long-term natural vegetation restoration in the Loess Plateau of China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2006, 64(1): 77–96
- [47] 吴才武, 夏建新, 段峥嵘. 土壤有机质测定方法述评与展望[J]. *土壤*, 2015, 47(3): 453–460
- [48] 方堃, 陈效民, 张佳宝, 等. 红壤地区典型农田土壤饱和和导水率及其影响因素研究[J]. *灌溉排水学报*, 2008, 27(4): 67–69
- [49] Zhao C L, Shao M A, Jia X X, et al. Using pedotransfer functions to estimate soil hydraulic conductivity in the Loess Plateau of China[J]. *Catena*, 2016, 143(143): 1–6
- [50] 李孝良, 陈效民, 周炼川, 等. 西南喀斯特地区土壤饱和和导水率及其影响因素研究[J]. *灌溉排水学报*, 2008, 27(5): 74–76
- [51] 吴华山, 陈效民, 叶民标, 等. 太湖地区主要水稻土的饱和导水率及其影响因素研究[J]. *灌溉排水学报*, 2006, 25(2): 46–49
- [52] 姚荣江, 张同娟, 李芙蓉, 等. 滩涂围垦农田土壤饱和和导水率的影响因素及转换函数研究[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(7): 790–797

Profile Distribution of Soil Saturated Hydraulic Conductivity and Controlling Factors Under Different Vegetations on Slope in Loess Region

MAO Na^{1,2,3}, HUANG Laiming^{1,3*}, SHAO Ming'an^{1,2,3,4}

(1 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4 College of Natural Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Soil saturated hydraulic conductivity (K_s) is an important parameter influencing hydrological processes and the accuracy of hydrological model simulation. Understanding the profile distribution of K_s and their controlling factors under different vegetations at the slope scale are conducive to better understand the hydrological process and its regulation mechanism. In this study, the K_s and soil basic properties were measured of 12 profiles (0–200 cm) under different vegetations on slopes. These profiles were chosen according to different vegetations (grassland and forestland) and different slope aspects (northeast orientation and west orientation). The objective of this study is to examine the changes in the vertical distribution of K_s and to identify the main controlling factors for the variations of K_s at the slope scale in a relative small region. The results showed that K_s under different vegetations decreased initially with depth and then tended to increase downward, and the average values of K_s ($K_{s-average}$) in 0–20 cm soil layer were significantly higher than that in 20–200 cm soil layer ($P < 0.05$). There were no significant differences of the $K_{s-average}$ in 0–20 cm soil layer among different vegetation types in the same slope as well as between different slopes for the same vegetation type ($P > 0.05$). However, due to the differences of soil texture and organic matter, the $K_{s-average}$ in 20–200 cm soil layer under grassland was higher than that under forestland in the northeast organization slope, and the $K_{s-average}$ in 20–200 cm soil layer in northeast orientation slope was higher than that in west orientation slope whether under grassland or forestland ($P < 0.05$). K_s under different vegetations were positively correlated with capillary porosity, saturated water content, sand and organic matter (except grassland in the west orientation slope) ($P < 0.05$), but were negatively correlated with bulk density, clay and silt content ($P < 0.05$). The factors influencing K_s can be attributed to three principal components: soil water retention capacity (49.36%), soil texture (24.98%) and soil fertility characteristic (13.92%). Based on the effects of soil properties, the pedotransfer functions (PTFs) of K_s under different vegetations were proposed by using multiple stepwise regression analysis. The PTFs with inputs of bulk density, soil texture and organic matter had a better fitting ability of K_s ($R^2 = 0.60 - 0.86$, $P < 0.001$), which could be used as a reference for the simulation and prediction of K_s at the slope scale in Liudaogou watershed.

Key words: Saturated hydraulic conductivity (K_s); Profile distribution; Influential factors; Vegetation types; Liudaogou watershed