

# 晋西北黄土丘陵区土壤饱和导水率的空间分布特征及影响因素

杨震<sup>1</sup>, 黄萱<sup>1</sup>, 余冬立<sup>2</sup>

(1.河海大学农业科学与工程学院, 南京 210098;

2.中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 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)

**摘要:** 土壤饱和导水率( $K_s$ )是反映土壤入渗性能与土壤持水能力的重要参数,为探究流域尺度下土壤 $K_s$ 的空间分布特征及影响因素,更好地掌握土壤水文过程与调节机理,选取晋西北黄土丘陵区朱家川流域横向梯度(上游、中游、下游)不同土地利用方式下的土壤(70个样点)为研究对象,采用定水头法测定土壤 $K_s$ ,并获取样点地形因子和其他土壤理化性质,通过建立土壤 $K_s$ 偏最小二乘回归模型(PLSR),分析影响土壤 $K_s$ 空间分布格局的主要因素。结果表明:(1)除土壤容重和砂粒含量为弱变异外,区域土壤理化性质其余因子均为中等变异;土壤 $K_s$ 在横向梯度下表现为上游>中游>下游;(2)不同土地利用方式下土壤 $K_s$ 差异显著( $P<0.05$ ),由高到低顺序为林地>农地>草地;(3)林地(VIP=1.997)与草地(VIP=1.710)利用方式、土壤容重(VIP=1.548)、土壤有机质(VIP=1.323)、大团聚体(VIP=1.266)、粉粒含量(VIP=1.062)和黏粒含量(VIP=1.049)是土壤 $K_s$ 变化的主要因素,林地利用方式影响程度最大。土地利用、土壤性质、地形因子均是影响黄土丘陵区土壤 $K_s$ 空间分布的主要因素,是用来模拟预测土壤 $K_s$ 空间分布的重要因子。

**关键词:** 黄土丘陵区; 饱和导水率; 土地利用; 分布特征; 流域

中图分类号:S152.7 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2020)06-0178-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.06.026

## Spatial Distribution Characteristics and Influencing Factors of Soil Saturated Hydraulic Conductivity in the Loess Hilly Region of Northwestern Shanxi

YANG Zhen<sup>1</sup>, HUANG Xuan<sup>1</sup>, SHE Dongli<sup>2</sup>

(1.College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098; 2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100)

**Abstract:** Soil saturated hydraulic conductivity ( $K_s$ ) is an important parameter reflecting soil infiltration performance and soil water holding capacity. Understanding the spatial distribution characteristics and influencing factors of soil  $K_s$  at the watershed scale is helpful to better comprehend soil hydrological processes and regulation mechanisms. Totally 70 soil samples were collected from different land use patterns in the horizontal gradients (upstream, midstream, downstream) of the Zhujiachuan watershed in the Loess Hilly Region of Northwestern Shanxi. The soil  $K_s$  was determined by constant-head method, the topographical factors and physical and chemical properties of the sample points were also measured to establish partial least-squares regression model of soil  $K_s$ , and then the main factors affecting the spatial distribution pattern of soil  $K_s$  were analyzed. The study showed that: (1) Soil bulk density and sand content showed a weak variation, but the other physical and chemical properties showed the moderate variations. The soil  $K_s$  performance in the horizontal gradients was upstream>midstream>downstream; (2) Soil  $K_s$  varied greatly with different land uses ( $P<0.05$ ), the sequence was forest land>agricultural land>grassland; (3) Forest land (VIP=1.997), grassland (VIP=1.710), soil bulk density (VIP=1.548), soil organic content (VIP=1.323), macro-aggregates (VIP=1.266), silt content (VIP=1.062) and clay content (VIP=1.049) were the main factors influencing soil  $K_s$ , among which the use of forest land gave the greatest impact. Land use, soil properties and topographical factors were the main factors affecting the spatial distribution of soil  $K_s$  in the Loess Hilly Region and could be used to simulate and predict the spatial distribution of soil  $K_s$ .

收稿日期:2020-04-08

资助项目:中国科学院“西部之光”计划项目

第一作者:杨震(1996—),男,硕士研究生,主要从事水土保持研究。E-mail:865845142@qq.com

通信作者:余冬立(1980—),男,教授,博士生导师,主要从事农田水土过程与侵蚀控制研究。E-mail:shedongli@gmail.com

**Keywords:** loess hilly region; saturated hydraulic conductivity; land use; distribution characteristics; watershed

土壤饱和导水率(saturated hydraulic conductivity,  $K_s$ )是反映土壤入渗能力的重要指标,其与土壤质地、结构和有机质含量等土壤基本性质显著相关;而土壤基本性质又受地形因素、土地利用等影响<sup>[1]</sup>,因此,在不同区域影响土壤  $K_s$  的主控因子不同。赵春雷等<sup>[2]</sup>对黄土高原北部坡面土壤  $K_s$  进行研究得出,土壤  $K_s$  随土壤容重、粉粒和黏粒含量增加而呈降低趋势;李平等<sup>[3]</sup>通过在黄土高寒区的小流域研究发现,土壤  $K_s$  除了受土壤性质的影响,还与地形条件有很大关联;李志等<sup>[4]</sup>研究认为,不同土地利用类型下土壤  $K_s$  存在显著差异性,地形部位和人为干扰是造成其差异的主要因素。可见,土壤  $K_s$  影响因素众多且复杂,对于主要影响因子的确定仍需进一步的研究。

晋西北黄土丘陵区位于黄土高原北部,属于干旱半干旱地区,是中国北方生态脆弱的农牧交错区<sup>[5]</sup>。区域气候干燥,降水量较少,土壤贫瘠,加之过度的人类经济活动,生态环境恶劣,风蚀沙化与土壤侵蚀的问题制约着当地经济发展。水资源的补给多来源于自然降雨,对该区域生态结构和功能起主要作用,而土壤水分状况又决定了该区域植被生长和恢复过程,因此,提高水资源的储存能力及利用效率是晋西北黄土丘陵区生态治理需要面对的重要问题<sup>[6]</sup>。探讨在不同地形条件、不同土地利用方式下表层土壤  $K_s$  的变化情况,有利于深入了解该地区的水文过程。目前,学者们在该区域围绕水土流失和生态恢复等问题进行了相关研究,如不同土地利用土壤碳氮储量研究<sup>[7]</sup>、表层土壤粒度和化学元素组成研究<sup>[8]</sup>、人工灌丛土壤水分和肥力变化研究<sup>[9]</sup>、不同植被水分时空变化研究<sup>[10]</sup>等。但本区作为水土流失较严重的区域,探讨影响土壤  $K_s$  变化因素的研究却鲜有报道。基于此,本试验选取晋西北黄土丘陵区朱家川流域为研究区域,对比分析不同小流域土壤  $K_s$  变化特征,建立土壤  $K_s$  与各环境因子之间的关系,运用偏最小二乘回归模型(PLSR)分析影响土壤  $K_s$  变化主控因子,旨在为区域植被恢复和水土资源管理提供科学理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

朱家川流域(38°42′—39°18′N, 110°58′—112°13′E)地处山西省西北部,发源于山西省朔县利民沟,于保德县境内汇入黄河,属黄河干流水系。该区域地势东高西低,海拔 789~2 774 m,面积 2 922 km<sup>2</sup>,属温带大陆性季风气候。年均降水量约 450 mm,主要降雨时期集中在 7—9 月;年平均气温 4.2~5.6 °C,无霜期 110~130 d。常见植被类型主要有针茅(*Stipa*

*capillata* L.)、柠条(*Caragana korshinskii* Kom.)、百里香(*Thymus mongolicus* Ronn.)、小叶杨(*Populus simonii* Carr.)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)等。地形地貌为典型的黄土丘陵区,主要土壤类型为栗褐土和风沙土。

### 1.2 研究方法

1.2.1 试验设计 于 2019 年 7—9 月对朱家川流域地形地貌和植被类型实地调查,沿整个流域上游向下,分别选取细岭沟、华家沟、郃家峪沟、柳树咀沟、高家沟、丛岭沟、后会沟 7 条典型的小流域作为研究区。在每条小流域内,按照不同的土地利用类型(林地、草地、农地)各布设 10 个样点,用 GPS 定位并记录样点经纬度和海拔,同时记录采样点周边环境信息(图 1)。开挖土壤剖面,采集 0—20 cm 土层的扰动土样和原状土样,扰动土用铁铲铲取整个土层,取样约 700 g;原状土采用直径 5 cm、体积 100 cm<sup>3</sup>规格的环刀进行采集,共计 70 个样点。每条小流域均采用无人机(大疆精灵 4 PRO V2.0)拍摄整体情况,进而获取高精度 DEM 和正射影像图。每条小流域选取无植被遮挡且信号较好的开阔地,布设 8~15 个点并铺以白纸作为标记,用 RTK(司南 T300)测量布设点获得位置信息,作为后期处理 DEM 数字高程模型的校正点。

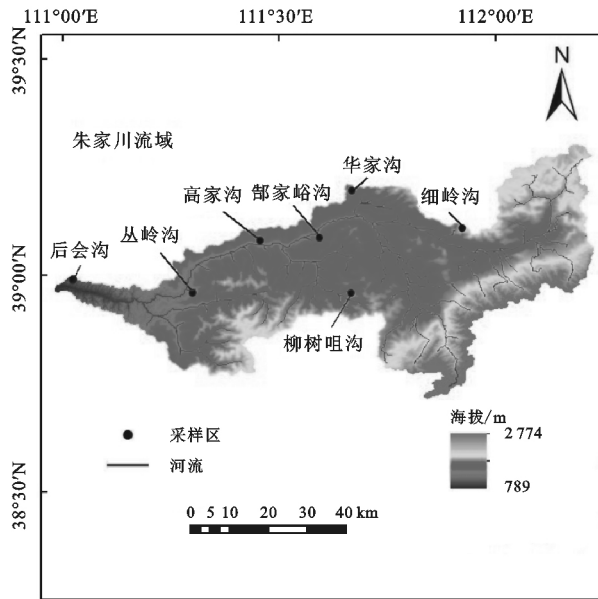
1.2.2 样品采集与分析 原状土样品用来测定土壤  $K_s$  及土壤容重。土壤  $K_s$  采用定水头法<sup>[11]</sup>测定,土壤容重采用烘干法测定。扰动土样品待自然风干后,过 5 mm 筛,采用湿筛法测定水稳性团聚体,粒径为 5~2, 2~1, 1~0.25, 0.25~0.053, <0.053 mm。将土样磨碎后过 2, 0.149 mm 筛,分别测定土壤机械组成及土壤有机质含量。土壤机械组成采用激光粒度仪(Bettersize 2000)测定,土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法—外加热法<sup>[12]</sup>测定。

运用 Photoscan 软件处理无人机航拍图片,生成高精度 DEM 和高分辨率正射影像图。在 GIS 平台下,根据采样点信息,结合 DEM 数字高程模型,在空间分析模块下提取每个样点的相关地形因子。选取的地形因子为海拔(elevation)、坡度(slope)、坡向(aspect)、剖面曲率(profile curvature)、平面曲率(plan curvature)、粗糙度(roughness)和地形湿润指数(wetness index)。

### 1.3 数据处理与分析

偏最小二乘回归法(partial least-squares regression, PLSR)主要用于研究多因变量对多自变量的回归建模<sup>[13]</sup>。本研究对土壤  $K_s$  与各环境因子间的关系进行分析,在 SIMCA 14.1 软件中建立和计算 PLSR 模型。采用交叉检验确定模型主成分的数量,

令最佳解释能力( $R^2$ )与模型预测能力( $Q^2$ )达到平衡。当成分可解释的因变量方差比( $Q_{cum}^2$ )达到最大,确定最优主成分数量。PLSR 建模过程中,通过变量投影重要性指标(variable importance for the projection, VIP)反映自变量与因变量的预测重要性,利用



回归系数(regression coefficients, RCs)表示模型中各个变量影响的方向与强度。有关偏最小二乘法的原理及方法参见文献[14-16]。采用 SPSS 20.0 软件进行 Pearson 相关性分析和正态检验(K-S),采用 Origin 9.0 软件作图。

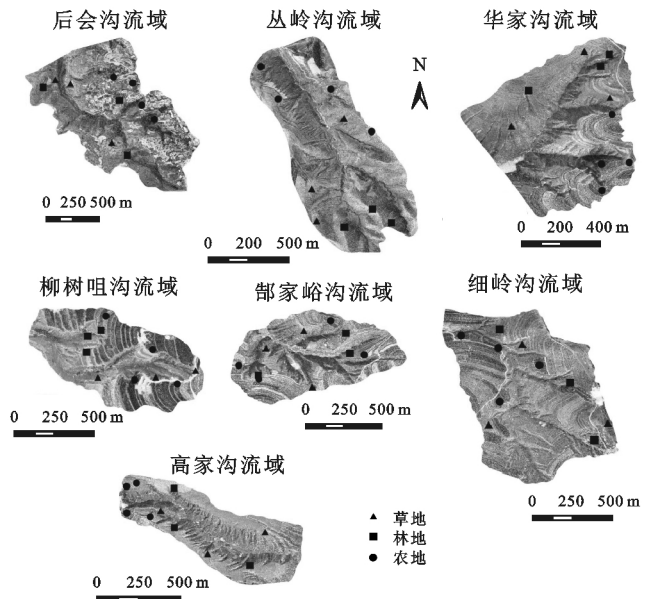


图 1 采样点示意

## 2 结果与分析

### 2.1 朱家川流域土壤理化性质概况

从表 1 可以看出,朱家川流域内土壤  $K_s$  变化范围为 0.08~2.35 mm/min,平均值为 0.89 mm/min;土壤容重和土壤有机质平均值分别为 1.28 g/cm<sup>3</sup> 与 9.00 g/kg。大团聚体(0.25~5 mm)和微团聚体(0.053~0.25 mm)占主要成分,平均分别为 36.59% 和 34.85%,粉黏组分(<0.053 mm)相对较少,平均占量为 28.56%。流域土壤

质地为砂土,砂粒含量占绝对优势,平均为 77.75%;粉粒与黏粒含量占比较少,平均分别为 18.76% 与 3.49%。根据经典统计学空间变异[17]理论,土壤有机质、大团聚体、微团聚体、粉黏组分、粉粒和黏粒含量均属于中等变异,而土壤容重和砂粒含量属于弱变异,说明流域整体的土壤容重和砂粒含量差异不明显。理化性质中土壤  $K_s$  的变异程度最大,这与赵春雷等[2]在黄土区的研究结果相一致。经单样本 K-S 法进行正态分布检验后,均符合正态分布。

表 1 土壤理化指标统计特征

项目	饱和导水率/ (mm·min <sup>-1</sup> )	容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )	大团 聚体/%	微团 聚体/%	粉黏 组分/%	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%
平均值	0.89	1.28	9.00	36.59	34.85	28.56	77.75	18.76	3.49
中数	0.72	1.26	8.24	37.98	34.22	28.52	79.11	17.51	3.29
最小值	0.08	1.13	1.93	19.36	17.13	9.89	64.00	11.58	2.41
最大值	2.35	1.52	21.67	52.55	57.95	47.72	85.99	30.65	5.78
标准差	0.60	0.08	4.52	7.30	9.13	7.64	5.16	4.56	0.69
变异系数	0.67	0.06	0.50	0.20	0.26	0.27	0.07	0.24	0.20
K-S	0.126	0.177	0.061	0.420	0.923	0.998	0.250	0.268	0.171

### 2.2 不同小流域、不同土地利用类型土壤饱和导水率差异

2.2.1 不同小流域土壤饱和导水率差异 由表 2 可知,朱家川流域上游段土壤  $K_s$  范围为 0.20~2.25 mm/min,中游段土壤  $K_s$  范围为 0.08~2.35 mm/min,下游段土壤  $K_s$  范围为 0.19~1.49 mm/min。流域土壤平均  $K_s$  表现为上游(1.00 mm/min) > 中游

(0.91 mm/min) > 下游(0.81 mm/min),上、中游与下游土壤  $K_s$  存在一定差异,这主要与朱家川上、中游实施的众多生态治理措施有关,如人工造林、天然林保护等,增加了中上游地区林地面积,改善了土壤质地,从而提高了土壤蓄水能力。3 个流域区段中,上游小流域土壤  $K_s$  变异系数最大,表现为 0.82,中下游小流域土壤  $K_s$  变异系数降低,分别为 0.68 和 0.54,

均属于中等变异。下游区段中丛岭沟与后会沟土壤  $K_s$  差异明显,主要由于后会沟相对丛岭沟耕作土地较少,植被覆盖率低,且牲畜数量较多导致的,2 条小流域土壤  $K_s$  都为中等变异。

表 2 不同小流域土壤饱和导水率统计特征

流域	采样区	平均值/ ( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	中数/ ( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	最小值/ ( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	最大值/ ( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	标准差/ ( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	变异 系数	K—S
上游	细岭沟	1.00	0.60	0.20	2.25	0.82	0.82	0.527
	华家沟	0.88	0.65	0.33	1.65	0.53	0.61	0.702
	郃家峪沟	0.92	0.64	0.27	2.35	0.72	0.78	0.348
中游	柳树咀沟	0.96	1.16	0.08	2.13	0.72	0.74	0.853
	高家沟	0.87	0.96	0.20	1.77	0.59	0.67	0.688
	中游段	0.91	0.73	0.08	2.35	0.62	0.68	0.245
	丛岭沟	0.95	1.19	0.19	1.49	0.50	0.53	0.442
下游	后会沟	0.68	0.64	0.25	1.21	0.34	0.51	0.971
	下游段	0.81	0.73	0.19	1.49	0.44	0.54	0.619

2.2.2 不同土地利用类型土壤饱和导水率差异 试验选取了农地、林地、草地作为研究对象,分析土壤  $K_s$  的差异性。由图 2 可知,对朱家川流域各土地利用类型土壤  $K_s$  平均值进行分析,林地的土壤  $K_s$  最大,为 1.56  $\text{mm}/\text{min}$ ;农地次之,为 0.81  $\text{mm}/\text{min}$ ;草地最小,为 0.34  $\text{mm}/\text{min}$ ,各土地类型的土壤  $K_s$  差异性显著( $p < 0.05$ )。细岭沟、华家沟、郃家峪沟、柳树咀沟林地的土壤  $K_s$  与农地和草地相比占有绝对优势。由于林地枯枝落叶的积累,可以有效增加土壤有机质含量,改善土壤结构<sup>[18]</sup>,进而导致其土壤  $K_s$  显著大于农地与草地。

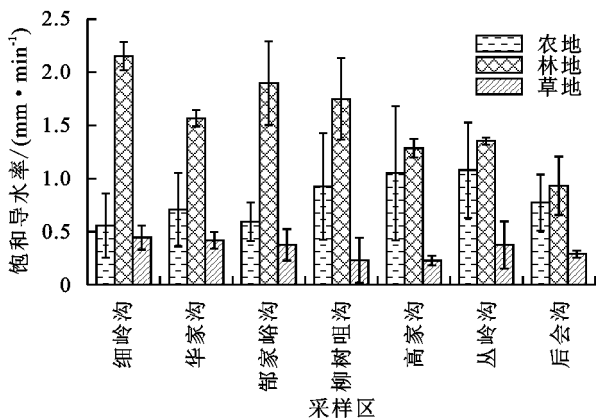


图 2 不同土地类型的土壤饱和导水率分布特征

2.3 Pearson 相关分析与 PLSR 模型模拟

选取土壤  $K_s$  和土壤容重、有机质、大团聚体(0.25~5 mm)、微团聚体(0.053~0.25 mm)、粉黏组分( $< 0.053$  mm)、砂粒含量、粉粒含量、黏粒含量、海拔、坡度、坡向、剖面曲率、平面曲率、粗糙度、地形湿润指数、土地利用等 17 个环境因子进行 Pearson 相关分析(表 3)。可以得到,土壤  $K_s$  与土壤容重、粉黏组分、粉粒和黏粒含量呈显著负相关,而与有机质、大团聚体、砂粒含量呈正显著关系。此外,土壤  $K_s$  还与坡度和土地利用呈显著正相关。土壤  $K_s$  的变化是土壤性质、地形因素和

土地利用多方面影响的结果<sup>[19]</sup>。

将上述环境因子导入 PLSR 模型,分析各个因子对土壤  $K_s$  的影响程度。土壤  $K_s$  偏最小二乘回归模型基于变量相关性,提取 2 个偏最小二乘回归成分。土壤  $K_s$  模型第 1 成分对  $K_s$  变异解释率为 74%,第 2 成分对  $K_s$  的变异解释率为 3.8%,总累积变异解释率为 77.8%。所有成分可解释因变量方差比  $Q_{cum}^2$  累积值为 0.724,说明模型解释性较好。

由图 3 可知,第 1 成分中,林地利用方式(FOR-EST)、土壤有机质(SOM)和土壤容重(BD)起主导作用,林地利用方式(FOREST)和土壤有机质(SOM)对土壤  $K_s$  有正向作用,土壤容重(BD)对土壤  $K_s$  有反向副作用。第 2 成分由对土壤  $K_s$  具有正作用的黏粒(CLAY)和具有反作用的草地利用方式(GRASS)主导。2 个成分中土地利用类型和土壤理化性质对土壤  $K_s$  的变异起主要作用。在不同的土地利用下,土壤的理化性质有较大差异,植物根系作用的不同也对土壤  $K_s$  造成一定影响<sup>[20]</sup>。因此,通过分析各环境因子变量投影重要性指标(VIP)值和回归系数(RCs)进一步分析对土壤  $K_s$  变化的贡献程度。

VIP 值反映了自变量对因变量贡献程度的高低。由图 4 可知,VIP 值  $> 1$  的变量个数为 7 个,分别为:林地利用方式(FOREST, 1.997)  $>$  草地利用方式(GRASS, 1.710)  $>$  土壤容重(BD, 1.548)  $>$  土壤有机质(SOM, 1.323)  $>$  大团聚体(MAC, 1.266)  $>$  粉粒(SILT, 1.062)  $>$  砂粒(SAND, 1.049)。对应的 RCs 为林地利用方式(0.276)、草地利用方式(-0.263)、土壤容重(-0.195)、土壤有机质(0.187)、大团聚体(0.141)、粉粒(-0.093)、砂粒(0.086)。林地(FORST)与草地利用方式(GRASS)VIP 值与其他变量相比占绝对优势,对  $K_s$  的影响效果分别为正向与反向,两者 RCs 值较大,说明在朱家川流域里土地

利用方式的不同对  $K_s$  的变化起主要作用。土壤容重 (BD)、土壤有机质 (SOM)、大团聚体 (MAC)、粉粒 (SILT)、黏粒 (CLAY) 为土壤理化性质因子, 其中土壤容重 (BD)、粉粒 (SILT)、黏粒 (CLAY) 对  $K_s$  具有负作用, 土壤有机质 (SOM)、大团聚体 (MAC) 对  $K_s$

为正作用, 这与相关性分析的结果一致, 运用 PLSR 模型更直观的体现了每个因子作用强度的大小与方向。地形因子中坡度 (SLOPE)、粗糙度 (ROU) VIP 值与  $R_c$  处于较高水平, 说明地形条件的不同也是引起土壤  $K_s$  变化的重要因素。

表 3 土壤  $K_s$  与环境因子的 Pearson 相关

ITE	$K_s$	BD	SOM	MAC	MIC	SC	SAND	SILT	CLAY	ELE	SLP	ASP	PRO	PLA	ROU	WET	LD
$K_s$	1																
BD	-0.571**	1															
SOM	0.484**	-0.365**	1														
MAC	0.466**	-0.229	0.169	1													
MIC	-0.109	-0.007	0.190	-0.587**	1												
SC	-0.315**	0.226	-0.389**	-0.254*	-0.634**	1											
SAND	0.374**	-0.290*	-0.207	0.093	-0.007	-0.080	1										
SILT	-0.382**	0.287*	0.207	-0.090	0.007	0.078	-0.988**	1									
CLAY	-0.274*	0.271*	0.180	-0.098	0.007	0.085	-0.886**	0.851**	1								
ELE	0.169	-0.063	0.091	0.196	0.050	-0.247*	0.072	-0.064	-0.117	1							
SLP	0.241*	0.010	-0.184	0.350**	-0.229	-0.061	0.228	-0.229	-0.195	0.104	1						
ASP	0.056	-0.102	0.092	-0.247*	0.122	0.090	0.052	-0.051	-0.055	-0.036	0.130	1					
PRO	0.130	-0.060	-0.004	0.241*	-0.187	-0.007	0.063	-0.051	-0.135	0.211	0.164	0.156	1				
PLA	-0.111	0.087	0.067	-0.099	-0.006	0.102	-0.105	0.107	0.077	-0.026	-0.063	-0.057	0.101	1			
ROU	0.174	0.073	-0.226	0.309**	-0.204	-0.051	0.215	-0.215	-0.187	0.143	0.958**	0.126	0.132	-0.039	1		
WET	-0.137	-0.155	0.133	-0.119	0.227	-0.158	-0.182	0.187	0.124	0.023	-0.369**	0.012	-0.176	-0.026	-0.359**	1	
LD	0.271*	-0.261*	0.206	-0.151	0.042	0.095	0.241*	-0.244*	-0.190	0.058	-0.555**	-0.109	-0.027	-0.085	-0.521**	0.105	1

注: \* 表示在 0.05 水平上显著相关; \*\* 表示在 0.01 水平上显著相关;  $K_s$  为饱和导水率; BD 为土壤容重; SOM 为土壤有机质; MAC 为大团聚体; MIC 为微团聚体; SC 为粉、黏粒组分; SAND 为砂粒; SILT 为粉粒; CLAY 为黏粒; ELE 为海拔; SLP 为坡度; ASP 为坡向; PRO 为剖面曲率; PLA 为平面曲率; ROU 为粗糙度; WET 为地形湿润指数; LD 为土地利用。

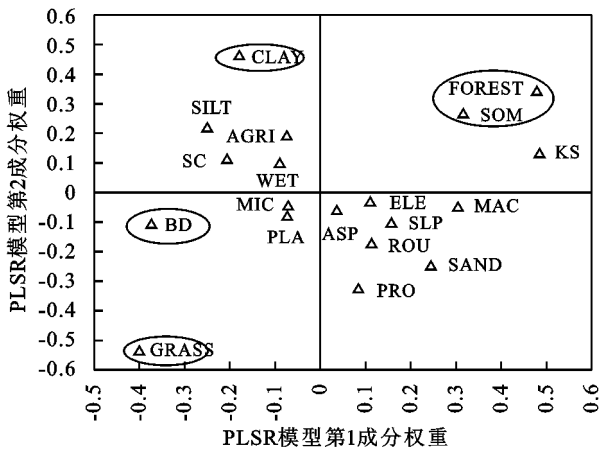


图 3 土壤饱和导水率 PLSR 模型第 1,2 主成分权重

### 3 讨论

本文以晋西北朱家川流域为研究区域, 系统研究了流域内各环境因子对土壤  $K_s$  的影响程度, 结合 Pearson 相关性分析和构建土壤饱和导水率 PLSR 模型分析得出影响土壤  $K_s$  变化的主控因子, 探究土地利用、土壤性质、地形条件对土壤  $K_s$  空间分布格局的影响, 模型最佳解释能力 ( $R^2$ ) 为 0.78, 模型预测能力 ( $Q^2$ ) 为 0.72, 说明模型解释性与稳定性较好。

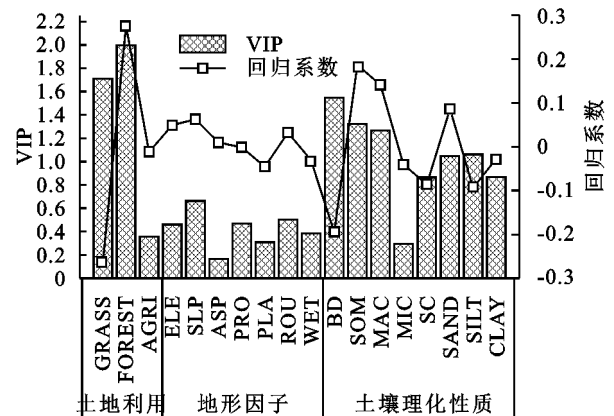


图 4 土壤饱和导水率 PLSR 模型中各因子 VIP 及回归系数

土地利用方式是人类与自然相互作用的体现, 植被覆盖类型、土壤结构、土壤质量和地表径流量等均受到其影响, 进而导致土壤导水性能发生变化<sup>[21]</sup>。由 PLSR 模型分析结果可知, 3 种土地利用类型对土壤  $K_s$  影响强度为林地 (1.56 mm/min) > 农地 (0.81 mm/min) > 草地 (0.34 mm/min), 结合图 2 对 7 条小流域土壤  $K_s$  的分析结果也体现出林地与草地的差异性显著。林地土壤是天然的贮水库, 植物根系作用增大了土壤孔隙度, 进而使得降雨形成的地表径流易

于通过地表渗入土层,土壤蓄水能力强,具有良好的水土保持功能<sup>[22]</sup>。落叶的堆积层经分解可以增加土壤有机质,土地状况得到改良,进而改善土壤导水能力。朱家川流域的中上游地区植被覆盖度与下游相比较,故整体土壤结构和质地优于下游地区,土壤 $K_s$ 也具有明显优势(表2)。由于草地退化、放牧等因素导致土壤板结,土体紧实通透性较差,草地土壤孔隙度小,水分不易渗透。农地土壤长期耕种,受人为扰动,各个小流域间干扰程度不同,导致土壤导水性能也不相同。李永宁等<sup>[23]</sup>在黄土丘陵区选取12种植被地进行分析得出,不同植被土壤残体生物量、毛管孔隙度、土壤容重等因素的不同,均对土壤 $K_s$ 产生较大影响;易扬等<sup>[24]</sup>研究了罗玉沟流域5种土地利用类型土壤的水分物理性质,通过相关性分析的方法阐述各因子间相互作用的关系发现,不同植被类型土壤 $K_s$ 存在显著差异。可见,不同植被覆盖类型对土壤入渗能力具有较大影响。

土壤理化性质中土壤容重、有机质、大团聚体、粉粒和砂粒含量均对土壤 $K_s$ 影响程度较大,其中土壤有机质、大团聚体和砂粒含量起正向作用,而土壤容重和粉粒含量起反向作用。流域内土壤理化性质均为中等变异(表1),砂粒含量平均为77.75%,属于砂土性质,土体通透性好,水分运移快,易于有机质分解<sup>[25]</sup>。容重是土壤的基本物理性质,对土壤通透性、贮水能力、入渗能力及溶质迁移具有重要影响。土壤有机质增多,可以改善土体结构,增强土壤透气性,减小容重,提高水分入渗效率<sup>[26]</sup>,这一结论与杨亚辉等<sup>[27]</sup>在王东沟流域研究的结果一致。大团聚体和砂粒含量的提高,有利于土壤大孔隙形成,增强土壤导水能力,而粉粒含量的增加则对土壤 $K_s$ 起抑制作用。

地形因子中,坡度对土壤 $K_s$ 的影响较大,对土壤 $K_s$ 均具有正向影响,但其VIP值 $<1$ ,影响程度小于土地利用与土壤性质。从对朱家川流域实地调查结果来看,中上游地区的植被恢复工作好于下游地区,天然林保护、人工林种植和抗侵蚀等措施有利于生态恢复和水土流失治理,土壤状况相对较好,土壤 $K_s$ 也表现为上游 $>$ 中游 $>$ 下游(表2)。晋西北地区营造人工林可以有效提高土壤 $K_s$ ,提高土壤贮水容量,对生态治理和防治地质灾害工作有重大意义。

#### 4 结论

(1)朱家川流域土壤理化性质除土壤容重与砂粒含量为弱变异,其余指标均为中等变异。流域尺度下上游的土壤 $K_s$ 平均值(1.00 mm/min)最大,中游(0.91 mm/min)次之,下游(0.81 mm/min)最小。不

同土地利用方式下的土壤 $K_s$ 差异显著( $P < 0.05$ ),土壤 $K_s$ 平均值从大到小顺序为:林地(1.56 mm/min) $>$ 农地(0.81 mm/min) $>$ 草地(0.34 mm/min)。

(2)由影响土壤 $K_s$ 的因子相关性分析得出,土壤 $K_s$ 与土壤容重、粉黏组分、粉粒和黏粒含量呈显著负相关,与有机质、大团聚体、砂粒含量、坡度和土地利用呈显著正相关。将变量导入PLSR模型分析,总累积变异解释率为77.8%,所有成分可解释因变量方差比 $Q^2_{cum}$ 累积值为0.724,模型解释性较好。

(3)林地利用方式(VIP=1.997)、草地利用方式(VIP=1.710)、土壤容重(VIP=1.548)、有机质(VIP=1.323)、大团聚体(VIP=1.266)、粉粒(VIP=1.062)和黏粒(VIP=1.049)含量是影响表层土壤 $K_s$ 的主要因素,其中林地利用方式对土壤 $K_s$ 的影响程度最大,起正向作用,植树造林可有效提高土壤导水性能,对当地生态恢复和水土流失治理具有重要意义。地形因子较土地利用与土壤性质影响程度偏小,但坡度和粗糙度等地形条件对土壤 $K_s$ 同样具有重要影响。因此,土地利用、土壤性质和地形因子均可作为模拟预测区域土壤 $K_s$ 空间分布特征的重要因子。

参考文献:

- [1] Wang T J, Istanbuluoğlu 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 Science*, 2015, 73(11): 7651-7660.
- [2] 赵春雷,邵明安,贾小旭.黄土高原北部坡面尺度土壤饱和导水率分布与模拟[J].*水科学进展*, 2014, 25(6): 806-815.
- [3] 李平,王冬梅,丁聪,等.黄土高寒区小流域土壤饱和导水率和土壤密度的分布特征[J].*中国水土保持科学*, 2019, 17(4): 9-17.
- [4] 李志,刘文兆,王秋贤,等.黄土塬区不同地形部位和土地利用方式对土壤物理性质的影响[J].*应用生态学报*, 2008, 19(6): 1303-1308.
- [5] 李秀芬,刘利民,齐鑫,等.晋西北生态脆弱区土地利用动态变化及驱动力[J].*应用生态学报*, 2014, 25(10): 2959-2967.
- [6] Wang Z Q, Liu B Y, Liu G, et al. Soil water depletion depth by planted vegetation on the Loess Plateau[J].*Science in China*, 2009, 52(6): 835-842.
- [7] 董云中,王永亮,张建杰,等.晋西北黄土高原丘陵区不同土地利用方式下土壤碳氮储量[J].*应用生态学报*, 2014, 25(4): 955-960.
- [8] 李继彦,周玲,刘益,等.晋西北地区表层土壤粒度与地球化学元素组成[J].*中国沙漠*, 2019, 39(5): 155-162.
- [9] 冀瑞瑞.晋西北黄土丘陵区小叶锦鸡儿灌丛土壤水分和肥力变化规律研究[D].太原:山西大学,2007.

- [10] 郭彪,王尚义,牛俊杰,等.晋西北不同植被类型土壤水分时空变化特征[J].水土保持通报,2015,35(1):267-273.
- [11] 樊艺峰.土壤饱和导水率研究现状分析[J].山西水利,2011,27(5):43-44,60.
- [12] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2007.
- [13] 郑一力,赵燕东,董玮,等.竹叶片氮含量高光谱估测方法对比研究[J].农业机械学报,2018,49(增刊1):393-400.
- [14] Liu L X, Wang Y J, Teng J Y, et al. Hyperspectral analysis of soil organic matter in coal mining regions using wavelets, correlations, and partial least squares regression[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2016, 188(2). <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5107-8>.
- [15] Tomoko T, Blair T, Takumi S, et al. Partial least squares regression calculation for quantitative analysis of metals submerged in water measured using laser-induced breakdown spectroscopy [J]. Applied Optics, 2018, 57(20):5872-5883.
- [16] Cozzolino D, Kwiatkowski M J, Damberg R G, et al. Analysis of elements in wine using near infrared spectroscopy and partial least squares regression[J]. Talanta, 2008, 74(4):711-716.
- [17] 白一茹,王幼奇,王建宇.黄土高原雨养区坡面土壤水动力学性质空间特征及影响因素[J].水土保持研究,2015,22(4):168-172,177.
- [18] 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.
- [19] 于冬雪,贾小旭,黄来明,等.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.
- [20] 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.
- [21] 任婷婷,王瑄,孙雪彤,等.不同土地利用方式土壤物理性质特征分析[J].水土保持学报,2014,28(2):123-126.
- [22] Hao M Z, Zhang J C, Meng M J, et al. Impacts of changes in vegetation on saturated hydraulic conductivity of soil in subtropical forests[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44921-w>.
- [23] 李永宁,王忠禹,王兵,等.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[J].水土保持学报,2019,33(6):176-181,189.
- [24] 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):45-49,56.
- [25] Gathala M K, Jat M L, Saharawat Y S, et al. Physical and chemical properties of a sandy loam soil under irrigated rice-wheat sequence in the indo-gangetic plains of South Asia[J]. Journal of Ecosystem and Ecography, 2017, 7(3):1-12.
- [26] Yang B, Tao C, Jie P, et al. Response of soil physical, chemical and microbial biomass properties to land use changes in fixed desertified land[J]. Catena, 2019, 160(1):339-344.
- [27] 杨亚辉,赵文慧,木热提江·阿不拉,等.不同植被对土壤理化性质影响:以王东沟小流域为例[J].水土保持通报,2016,36(1):249-252.
- (上转第 177 页)
- [30] 陈念,高向阳,林壁润.万隆霉菌抑制细菌的作用机理初探[J].西北农林科技大学(自然科学版),2005,33(51):143-148.
- [31] 赵艳,张晓波,郭伟.不同土壤胶质芽孢杆菌生理生化特征及其解钾活性[J].生态环境学报,2009,18(6):2283-2286.
- [32] 饶本强,刘永定,胡春香,等.人工藻结皮技术及其在沙漠治理中的应用[J].水生生物学报,2009,33(4):756-761.
- [33] Doherty K D, Antoninka A J, Bowker M A, et al. A novel approach to cultivate biocrusts for restoration and experimentation[J]. Ecological Restoration, 2015, 33(1):13-16.
- [34] 王伟波.接种蓝藻修复生物土壤结皮的研究[D].武汉:中国科学院水生生物研究所,2009.
- [35] 毕永红.念珠藻的接种对半荒漠土壤结构稳定性的作用[C].中国地理学会自然地理专业委员会.“土地变化科学与生态建设”学术研讨会论文集.中国地理学会自然地理专业委员会:中国地理学会,2004:569-575.
- [36] 张丙昌,王敬竹,玛依努尔,等.生物结皮中几种优势藻和齿肋赤藓(*Syntrichia caninervis* Mitt.)种间关系研究[C].生态文明建设中的植物学:现在与未来——中国植物学会第十五届会员代表大会暨八十周年学术年会论文集:植物生态与环境保护,2013.