

三峡库区典型农业小流域土壤饱和导水率特征

韩唯^{1,2}, 陈晓燕^{1,2}, 陶婷婷^{1,2}

(1.西南大学 水土保持生态修复重庆市重点实验室, 重庆 400716; 2.西南大学 资源环境学院, 重庆 400716)

摘要: [目的] 通过简单易测的土壤性质来建立传递函数从而间接获得土壤饱和导水率(K_s), 为三峡库区典型农业小流域土壤水分运移及模拟提供数据支撑。[方法] 试验以三峡库区石盘丘小流域为研究对象, 通过测定典型土地利用类型(耕地、园地、草地)的饱和导水率及其他土壤基本理化性质, 结合相关性和主成分分析, 分别运用多元线性回归(MLR)、BP神经网络(BP-ANN)、支持向量机(SVM)法构建研究区表层土壤饱和导水率的传递函数模型。在此基础上, 选取4种常见的饱和导水率传递函数模型, 验证其在本研究区的适用性。[结果] 土壤 K_s 均值大小表现为: 草地>园地>耕地, 且在不同土地利用类型间存在显著差异; 土壤饱和导水率与容重、有机质含量、饱和含水量、土壤质地显著相关; 与多元线性回归、BP神经网络、支持向量机构建的 K_s 传递函数模型相比, 以往采用的土壤传递函数模型对本研究区土壤饱和导水率的预测效果较差, 三种方法建立的传递函数预测精度表现为: SVM>BP-ANN>MLR, 而采用主成分 P_1 和主成分 P_2 作为输入变量的预测精度更佳。[结论] 不同土地利用类型下的 K_s 值具有较强的空间变异性, 通过BP神经网络和支持向量机构建的饱和导水率传递函数模型能满足本研究区 K_s 预测要求, 其中支持向量机法的预测精度优于BP神经网络。

关键词: 三峡库区; 农业小流域; 饱和导水率; 土壤传递函数; 支持向量机; BP神经网络

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2024)05-0083-09

中图分类号: S152.7

文献参数: 韩唯, 陈晓燕, 陶婷婷. 三峡库区典型农业小流域土壤饱和导水率特征[J]. 水土保持通报, 2024, 44(5): 83-91. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.05.010; Han Wei, Chen Xiaoyan, Tao Tingting. Characteristics of soil saturated hydraulic conductivity in typical agricultural small watershed of Three Gorges reservoir area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(5): 83-91.

Characteristics of Soil Saturated Hydraulic Conductivity in Typical Agricultural Small Watershed of Three Gorges Reservoir Area

Han Wei^{1,2}, Chen Xiaoyan^{1,2}, Tao Tingting^{1,2}

(1. Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Ecological

Restoration of Chongqing, Southwest University, Chongqing 400716, China;

2. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China)

Abstract: [Objective] The pedo-transfer functions was established through the simple and easily measurable soil properties, and the soil saturated hydraulic conductivity was obtained indirectly, in order to provide data support for soil water transport and simulation of typical agricultural small watershed of the Three Gorges reservoir area. [Methods] Using the Shipanqiu watershed of the Three Gorges reservoir area as the research object, the soil saturated hydraulic conductivity (K_s) and other basic physical and chemical properties of typical land use types (cultivated land, garden land, and grassland) were measured. In addition to correlation and principal component analysis, multiple linear regression (MLR), BP neural network (BP-ANN), and support vector machine (SVM) methods were used to construct pedo-transfer functions for the saturated hydraulic conductivity of the surface soil in the study area. Furthermore, four common pedo-transfer

收稿日期: 2024-03-04

修回日期: 2024-06-05

资助项目: 重庆市技术创新与应用发展专项重点项目“中低产坡耕地质量提升及土壤固碳增汇协同生态技术集成与应用”(CSTB2022TIAD-LUX0005); 国家自然科学基金项目“饱和紫色土坡面降雨片流与集中水流侵蚀过程及动力机制”(42177314); 重庆市研究生科研创新项目“野外长坡面侵蚀—沉积泥沙分选时空变化特征研究”(CYS23200)

第一作者: 韩唯(2000—), 女(汉族), 湖北省黄冈市人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。Email: veivei0823@163.com。

通信作者: 陈晓燕(1971—), 女(汉族), 重庆市人, 教授, 博士, 主要从事土壤侵蚀与流域治理研究。Email: c400716@126.com。

functions were selected to verify their applicability in this study area. [Results] The average soil K_s values were in the order of grassland>garden>cultivated land, with significant differences among different land use types. The saturated hydraulic conductivity of the soil was significantly correlated with bulk density, organic matter content, saturated water content, and soil texture. Compared with the K_s pedo-transfer functions established through multiple linear regression, BP neural network, and support vector machine, the previously used soil transfer functions model have poor prediction performance for soil saturated hydraulic conductivity in this study area. The forecast accuracy of the transfer function created using the three methods was in the order of SVM>BP-ANN>MLR, and the forecast accuracy created using principal component P_1 and P_2 as input variables was better than others. [Conclusion] The K_s values under different land use types have strong spatial variability. The pedo-transfer functions built through BP-ANN and SVM can meet the prediction requirements of K_s in this study area, and the prediction accuracy of SVM is better than that of BP-ANN.

Keywords: Three Gorges reservoir area; agricultural small watershed; saturated hydraulic conductivity; pedo-transfer function; support vector machine; back propagation neural network

土壤饱和导水率(K_s)是指土壤水分充分饱和时,单位水力梯度下的水流通量,是反映土壤渗透性的关键土壤水力参数之一。过去我们常采用实验室环刀法和田间现场测定法来获得其数值,但采用上述方法测定流域或区域尺度的土壤饱和导水率需要消耗大量的人力、物力和财力,因此学者们构建了许多土壤传递函数(PTFs)来估算饱和导水率^[1]。土壤传递函数旨在将土壤水力学参数与更容易测量的土壤性质联系起来,由此建立相关关系来估算土壤水力学参数,其应用减少了大量饱和导水率的测算工作,只要所建立的模型能够准确地估计出土壤饱和导水率,则可为大尺度的研究提供一种便利的手段^[2]。

土壤饱和导水率受多种因素的影响,因此学者们运用大量试验对饱和导水率作了深入研究。赵亚丽等^[3]分析黄土高原土壤的饱和导水率发现,受地形、土地利用类型以及采样时间等外界环境变化的影响,研究区的土壤饱和导水率具有明显的时空异质性;刘目兴等^[4]通过对三峡库区典型林地土壤大孔隙特征的研究,发现土壤 K_s 与大孔隙半径、密度和大孔隙面积比呈现显著相关关系。土壤饱和导水率受人类活动、植被生长和土壤性质等多因素的共同影响而呈现出明显的空间异质性,同时由于传递函数本身较强的地域性,使其在不同地区上的应用具有局限。因此,在使用土壤传递函数预测 K_s 时,需要进行区域验证。

康文蓉等^[5]在黑河中游荒漠绿洲过渡带的研究发现,土壤饱和导水率主要受容重、水分含量和黏粒含量的影响,并以此为输入变量,采用逐步回归分析方法建立了适于荒漠绿洲过渡带的土壤饱和导水率传递函数;孙志祥等^[6]以横断山地区森林为研究区,

结合其土壤含石率偏高的特点,发现以土壤石砾含量、土壤容重、有机质含量、颗粒分布作为输入变量构建的 K_s 传递函数可以较好地预测该地区的土壤饱和导水率。目前,国内外关于喀斯特地区^[7]、干旱地区^[8]、黄土丘陵区^[9]土壤饱和导水率的研究及其传递函数的构建,开展了大量研究并取得了丰硕成果,但鲜有对三峡库区土壤传递函数的研究,因此有必要建立一套适用于研究区域且精度高的土壤传递函数。与此同时,各类机器学习算法的成熟使其也可被应用到土壤传递函数的构建中。三峡库区多山地丘陵,土地利用类型复杂多样。农业小流域在三峡库区分布广泛,是易产生水土流失的主要区域。本试验以三峡库区石盘丘小流域为研究区,分析不同土地利用类型下表层土壤 K_s 及其他基本理化性质差异,通过多种手段(多元线性回归、BP 神经网络、支持向量机)建立适合研究区的饱和导水率传递函数,并验证前人研究得出的土壤 K_s 传递函数模型在石盘丘小流域的适用性。研究结果可为流域土壤水分运动提供理论基础。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区域位于重庆市忠县石宝镇新政村石盘丘小流域(108°08′—108°12′E,30°24′—30°30′N),是三峡库区典型的农业小流域,海拔 119—240 m,年均降雨量 1 100 mm,多集中在 5—9 月,属湿润季风气候类型。土地利用类型以耕地、草地和园地为主,耕地种植有玉米(*Zea mays*),红薯(*Ipomoea batatas*)、芝麻(*Sesamum indicum*)等粮食作物,园地主要种植柑橘(*Citrus reticulata*),为当地主要的经济作物,草地主要以空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)和

白茅草(*Imperata cylindrica*)等为主。

1.2 土壤样品采集与测定

于 2021 年 6 月,在选定的研究区内进行土壤样品的采集。用容积为 100 cm³ 环刀采集采样点的表层土壤测定其容重,饱和含水量及饱和导水率。在环刀点附近采集自然土壤样品放入袋中,用以土壤质地及有机质含量的测定。为了兼顾取样的代表性和均匀性。本试验共布设 55 个样点,包括耕地、园地、草地,样点个数分别为 28,16 和 11 个(图 1)。

土壤容重的测定采用环刀法;土壤饱和含水量采用浸泡烘干称重测得;土壤质地的测定使用的是激光粒度仪,并按美国制分级标准:砂粒(2~0.05 mm),粉粒(0.05~0.002 mm),黏粒(<0.002 mm);土壤有机质含量的测定采用 K₂Cr₂O₇ 加热法。饱和导水率的测定采用双环刀法。

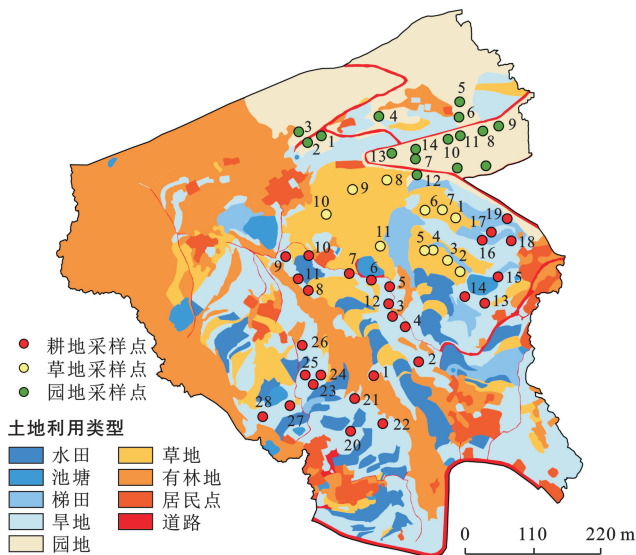


图 1 研究区土地利用现状及采样点位置示意图

Fig.1 Schematic diagram of land use distribution and sampling point location at study area

1.3 土壤传递函数研究方法

1.3.1 多元线性回归 多元线性回归是指通过回归方程对单一因变量和多个自变量之间线性相关关系进行定量描述。通常,多元线性回归方程可表示为

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots + b_nx_n \quad (1)$$

其中 y 是因变量, $x_1, x_2 \dots x_n$ 是自变量, $b_0, b_1, b_2 \dots b_n$ 是回归系数。参数的值通过最小二乘法估计。在 SPSS 中执行多元回归程序后,因子将根据其与 K_s 的线性关系的顺序输入方程,由此建立了线性回归模型。由于在回归过程中将删除某些参数,因此最终进入模型的参数将取决于实际情况。

1.3.2 BP 神经网络 BP 神经网络是一种基于误差逆向传递学习方法的多层次神经网络。在过去的半个世纪中,该算法已用于许多应用,并在各个领域取得了重大成就^[10]。人工神经网络不需要事先建立自变量与因变量之间的函数关系式就能充分模拟其间的复杂关系。BP 神经网络的构建在 Matlab 中的神经网络工具箱中进行。土壤饱和含水率预测模型共有 3 层,输入层、隐含层和输出层,其中输入层的节点个数即为土壤理化性质参数个数,输出层为 1 个节点,用于输出土壤饱和导水率的预测值。隐含层为 1 层,节点个数需要通过不断试验获得最佳的节点数目。

1.3.3 支持向量机 支持向量机(SVM)是一种基于统计学习理论的机器学习算法,它基于 Vapnik-Chervonenkis 维度理论,最初由 Vapnik 于 1963 年为线性模型开发^[11],后来在 1995 年由 Cortes 和 Vapnik^[12] 扩展到非线性训练数据。支持向量机回归通过 libsvm 工具箱完成,选取径向基函数作为核函数。支持向量机模型中有两个关键参数 C 与 g 。 C 是惩罚系数,即误差的宽容度, C 越大,说明对误差容忍度越低; C 越小则容易欠拟合。 g 是选择 RBF 函数作为核函数后,该函数自带的一个参数,反映将数据映射到新的特征空间后的分布特征。通过交叉验证,寻找最佳的 C 参数和 g 参数。设立两个样本子集 A 和 B,对数据集进行拟合验证。

1.3.4 PTFs 模型 将采样点土壤参数输入到 Cosby^[13], Saxton^[14], Wosten^[15], Puckett^[16] 4 种常见的模型中建立土壤 K_s 的 PTFs,得到采样点饱和导水率模拟值,与采样点饱和导水率实测值进行对比。各 PTFs 形式详见表 1。

表 1 土壤饱和和导水率传递函数

Table 1 Pedo-transfer functions of soil saturated hydraulic conductivity

模型名称	PTFs 形式
Cosby 模型	$K_s = 2.91 \times 10^{-5} \times 10^{(0.869 + 0.049S_a + 0.032 2C_l)} / 144$
Saxton 模型	$K_s = [12.012 - 0.075 5 \times S_a + (-3.985 + 0.036 7 \times S_a - 0.11 \times C_l + 8.755 \times 10^{-4} \times C_l^2) / \theta_s] / 144$
Wosten 模型	$K_s = [9.5 - 1.471 \times \rho_b^2 - 0.688 \times OM + 0.036 9 \times OM^2 - 0.332 \times \ln(S_l + S_a)] / 144$
Puckett 模型	$K_s = 156.96 \times \exp(-0.198 \times C_l) / 144$

注:表中 K_s 为饱和导水率(m/d); ρ_b, OM 分别为土壤容重(g/cm³)和土壤有机质含量(g/kg); θ_s 为土壤饱和含水量(%); C_l, S_l, S_a 分别为土壤的黏粒、粉粒和砂粒含量(%)。下同。

1.4 评价指标

以平均误差(ME)、均方根误差(RMSE)、决定系数(R^2)作为测试指标,对各模型的预测值与实测值的吻合程度进行评估。用变异系数(C_v)评价土壤基本理化性质的空间离散程度。

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O - P) \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O - P)^2} \quad (3)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P - O)^2}{\sum_{i=1}^N (O - \bar{O})^2} \quad (4)$$

$$C_v = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O - \bar{O})^2}}{\bar{O}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: O 指饱和导水率的实际测量值,而 P 是指由传递函数得到的估算值; \bar{O} 指实际得到的饱和导水率的平均值; N 表示样本数量。

在各测试指标中,ME可以表示预测结果与实际数据之间的偏差。RMSE用于评估预测值与实测值的吻合程度, R^2 反映了预测值和实测值间的拟合优度。

1.5 数据分析

采用EXCEL 21.0软件进行数据统计和初步处理,分析不同土地利用类型下的土壤性质差异。饱和导水率与土壤基本理化性质的相关性及其主成分分析采用SPSS 21.0软件进行,筛选出影响饱和导水率的主要因素。在此基础上,通过SPSS的多元回归分析,Matlab 2022b的神经网络工具箱及libsvm工具箱3种方法来预测研究区的土壤饱和导水率。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质及饱和导水率

表2统计了不同土地利用类型下土壤基本理化性质。由表2可知,采样点的土壤颗粒中粉粒含量最多,砂粒次之,黏粒最少,按照国际制土壤质地分类标准,采样点的土壤可被归类为粉砂壤土,其中草地黏粒和粉粒的平均含量最高,而耕地砂粒的平均含量最高。土壤容重大小表现为:耕地>园地>草地,耕地的平均容重达 1.43 g/cm^3 ,耕地与园地和草地间的容重大小无显著差异。耕地有机质含量的平均值为 16.04 g/kg ,园地为 18.62 g/kg ,草地为 20.75 g/kg ,耕地与草地的有机质含量大小存在显著差异。饱和含水量大小为耕地最高,园地次之,草地最小,饱和含水量在耕地与草地间也存在显著差异。

表 2 不同土地利用类型的土壤理化性质
Table 2 Soil physical and chemical properties of different land use types

项目	耕地	园地	草地
容重/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	1.44 ± 0.05^a	1.33 ± 0.06^a	1.32 ± 0.04^a
饱和含水量/%	28.04 ± 0.97^a	24.48 ± 0.52^b	19.40 ± 0.42^c
有机质含量/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	16.04 ± 0.71^a	18.62 ± 0.52^b	20.75 ± 0.43^c
黏粒/%	7.08 ± 0.50^a	8.60 ± 0.27^b	11.26 ± 0.44^c
粉粒/%	58.07 ± 0.95^a	68.61 ± 0.33^b	75.40 ± 0.44^c
砂粒/%	34.85 ± 0.59^a	22.79 ± 0.56^b	13.34 ± 0.64^c

注:表中同行不同小写字母表示不同土地利用类型间差异显著。

表3显示了不同土地利用类型饱和导水率的统计特征。耕地的饱和导水率介于 $0.01 \sim 1.56 \text{ m/d}$,平均值为 0.45 m/d ;园地的饱和导水率介于 $0.74 \sim 5.02 \text{ m/d}$,平均值为 2.60 m/d ;草地的饱和导水率介于 $2.13 \sim 12.71 \text{ m/d}$,平均值为 5.58 m/d 。3种土地利用类型的土壤 K_s 变异范围较大,耕地饱和导水率的变异度达 87.47% ,园地和草地的变异度也均大于 50% ,不同土地利用类型的土壤 K_s 呈现显著差异($p < 0.05$)。

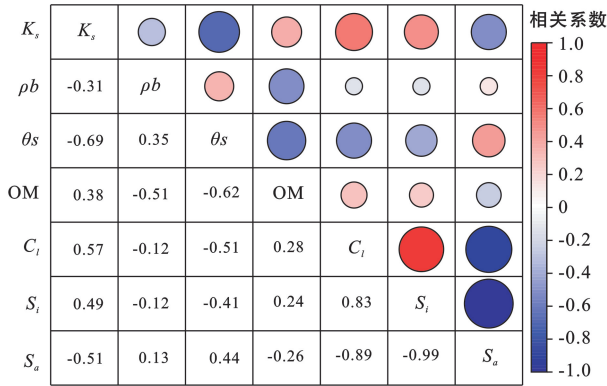
表 3 不同土地利用类型饱和导水率的统计特征
Table 3 Statistical characteristics of saturated hydraulic conductivity of different land use types

地类	饱和导水率/ $(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$			标准差	变异系数/%
	最小值	最大值	平均值		
耕地	0.01	1.56	0.45	0.05	87.47
园地	0.74	5.02	2.60	0.27	55.71
草地	2.13	12.71	5.58	0.43	54.46

2.2 土壤饱和导水率与理化性质相关性分析

对饱和导水率及其他土壤理化性质进行Spearman相关分析,结果如图2所示。饱和导水率与土壤容重、饱和含水量、砂粒含量呈显著负相关,与有机质含量、黏粒含量、粉粒含量呈显著正相关,且饱和含水量、土壤有机质、黏粒、粉粒、砂粒均在 $p < 0.01$ 显著水平下呈现相关,土壤容重在 $p < 0.05$ 显著水平下呈现相关,由此可以将上述6个土壤基本理化性质参数作为输入变量建立土壤传递函数。

此外,对土壤理化性质指标进行主成分分析(PCA),经PCA后6个主成分的总方差解释如表4所示。结果表明 P_1 和 P_2 的累计方差贡献率达 81.47% ,表明可以用这两结果来解释 81.47% 的土壤基本性质。根据累计方差达到 80% 以上及特征值大于1的原则,可以选取 P_1 和 P_2 作为土壤基本性质的替代变量。



注：图中各字母含义同前。*，** 分别表示在 $p < 0.05, p < 0.01$ 水平显著相关。

图 2 土壤饱和和导水率与各理化性质相关矩阵

Fig.2 Thermodynamic of correlation between soil saturated hydraulic conductivity and physicochemical properties

经计算得到主成分 P_1 和 P_2 的表达式如下所示，代入相关数据即可得到以 P_1 和 P_2 作为输入变量时的数值。

$$P_1 = -0.198 \times \rho_b - 0.389 \times \theta_s + 0.303 \times OM + 0.484 \times C_i + 0.485 \times S_i - 0.498 \times S_a \quad (6)$$

$$P_2 = 0.583 \times \rho_b + 0.331 \times \theta_s - 0.557 \times OM + 0.239 \times C_i + 0.305 \times S_i - 0.301 \times S_a \quad (7)$$

2.3 土壤饱和和导水率传递函数构建

采用多元线性回归、BP 神经网络、支持向量机 3

种方法构建土壤饱和和导水率的传递函数，分别将容重、有机质含量、饱和含水量、土壤质地以及经过主成分分析后的第一主成分 P_1 、第二主成分 P_2 作为土壤传递函数的输入变量，比较其预测精度。将 55 个样本随机分成 A、B 两份，样本个数分别为 40 和 15，利用样本 A 来建立模型，而样本 B 用于模型检验。后将采样点土壤参数输入到 Cosby^[13]，Saxton^[14]，Wosten^[15]，Puckett^[16] 4 种模型中建立土壤 K_s 的 PTFs，得到采样点饱和和导水率模拟值，与其实测值进行对比。采用平均误差、均方根误差、决定系数作为检验指标，对各土壤传递函数模型的预测结果进行精度分析(表 5)。

表 4 各因子载荷及特征值

Table 4 Load and characteristic values of each factor

指标项目	主成分	
	P_1	P_2
容重	-0.365	0.716
饱和含水量	-0.716	0.406
有机质含量	0.557	-0.684
黏粒	0.891	0.293
粉粒	0.892	0.374
砂粒	-0.915	-0.369
特征值	3.38	1.51
方差贡献率/%	56.37	56.37
累积方差贡献率/%	25.10	81.47

表 5 饱和和导水率预测精度分析

Table 5 Analysis of accuracy in predicting saturated hydraulic conductivity

构建方法	输入变量	平均误差	均方根误差	决定系数 R^2
MLR	$\rho_b, \theta_s, OM, C_i, S_a, S_i$	2.352×10^{-7}	1.652	0.560
	P_1, P_2	1.284×10^{-7}	1.860	0.442
BP-ANN	$\rho_b, \theta_s, OM, C_i, S_a, S_i$	-0.190	1.455	0.714
	P_1, P_2	-0.045	1.200	0.773
SVM	$\rho_b, \theta_s, OM, C_i, S_a, S_i$	0.123	1.148	0.799
	P_1, P_2	0.189	1.142	0.813
Puckett 模型	C_i	-1.598	4.584	0.174
Cosby 模型	S_a, C_i	1.440	3.065	0.152
Saxton 模型	S_a, C_i, θ_s	1.125	2.683	0.207
Wosten 模型	ρ_b, OM, S_i, S_a	1.362	2.846	0.001

注：MLR 表示多元线性回归，BP-ANN 表示 BP 神经网络，SVM 表示支持向量机。

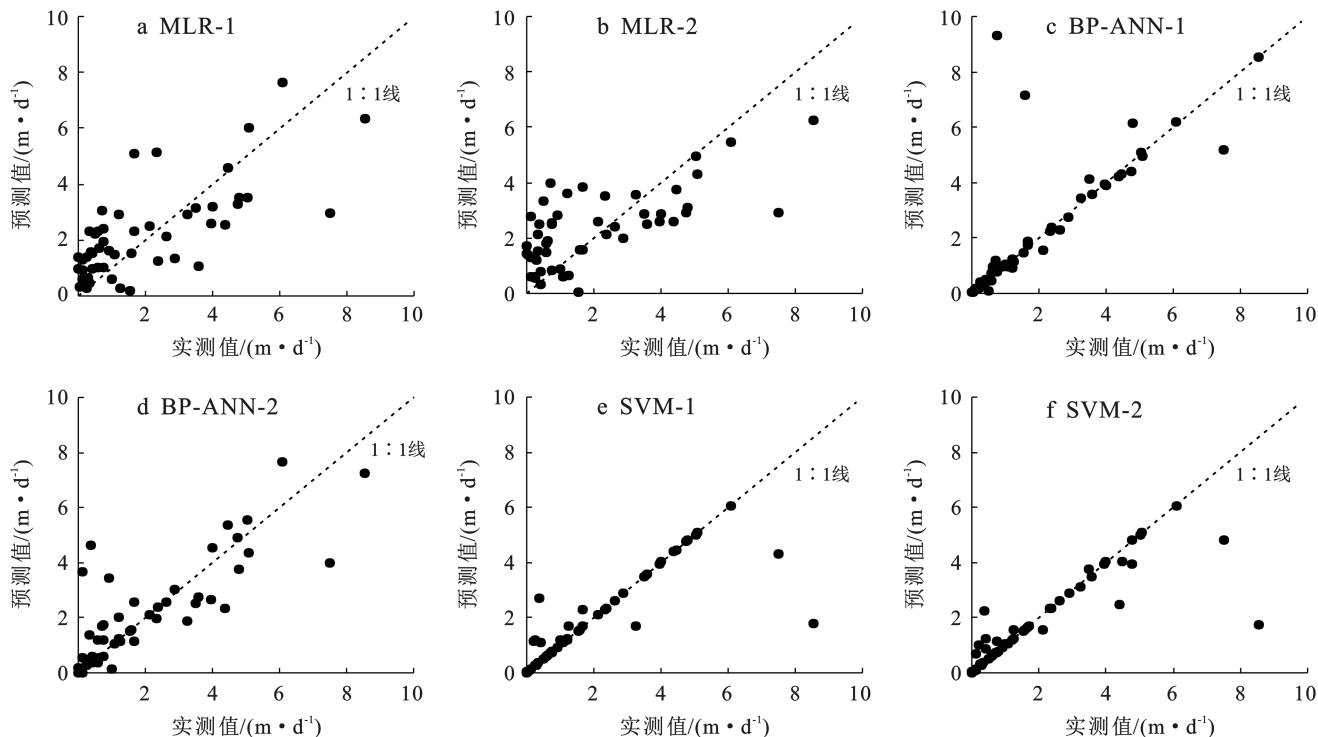
由表 5 可知，无论何种输入变量，通过 BP 神经网络和支持向量机构建的土壤传递函数精度明显优于多元线性回归所构建的；而采用经过主成分分析的第一主成分 P_1 和第二主成分 P_2 作为输入变量时的预测精度也优于将容重、有机质含量、饱和含水量、土壤质地作为输入变量时。经量化比较，当输入变量为容重、有机质含量、饱和含水量、土壤质地时，BP 神经网络和支持向量机构建传递函数的 ME、RMSE、 R^2

分别为 -0.190, 1.455, 0.714 和 0.123, 1.148, 0.799。当输入变量为 P_1 和 P_2 时，BP 神经网络和支持向量机所构建传递函数的 ME、RMSE、 R^2 分别为 -0.045, 1.200, 0.773 和 0.189, 1.142, 0.813。采用 BP 神经网络构建的传递函数预测值总体上大于实测值，支持向量机法则是预测值总体上小于实测值，支持向量机的预测效果更佳。通过多元线性回归构建的传递函数在两种输入变量下决定系数均小于 0.5，通过图 3 也

可以看出经过多元线性回归构建的传递函数模型预测结果相对于 1:1 线偏离程度较大,预测效果不太理想,由此可见,采用多元线性回归构建的传递函数预测精度较差,不适用于本研究区。通过 BP 神经网络和支持向量机构建的传递函数模型拟合效果好,可用于构建研究区土壤 K_s 的传递函数,但从预测精度的角度考虑,优先推荐使用支持向量机法。

对不同方法及不同输入变量所构建土壤传递函数的预测值与实测值进行比较。从 ME 来看,除了

Puckett 函数总体上预测值高于实测值外, Cosby、Saxton、Wosten 函数 ME 均大于 0,说明它们的预测值总体上都低于实测值。就 RMSE 值而言, Saxton 和 Wosten 函数的预测精度高于 Cosby 和 Puckett 函数,其中 Puckett 函数的预测精度最差。4 种函数的 R^2 均小于 0.3,拟合效果较差。综合比较下,4 种 PTFs 模型的预测效果都不太理想,说明土壤传递函数具有明显的区域性,上述 4 种土壤传递函数不适用于本研究区土壤饱和导水率的预测。



注:MLR,BP-ANN,SVM 分别表示多元线性回归,BP 神经网络,支持向量机;1 表示输入变量为容重、有机质、饱和含水量、土壤质地;2 表示输入变量为主成分 P_1 和 P_2 。

图 3 饱和导水率土壤传递函数的预测值与实测值对比

Fig.3 Comparison between measured and PTFs-estimated values of soil saturated hydraulic conductivity

3 讨论

3.1 不同土地利用类型饱和导水率对比

研究发现,各土壤基本性质参数存在相互作用,且不同研究区土壤 K_s 的主要影响因素存在差异^[17-18]。本研究中,土壤饱和导水率与容重呈负相关,与有机质含量呈正相关,这与杨震等^[9]、姚荣江等^[19]的研究结果相同。当容重增加时,土体孔隙体积变小,水分运移受阻,从而降低饱和导水率;而土壤有机质能够促进土壤团聚体的发育进而改善土壤结构。因此通常土壤有机质含量越高,土壤结构越好,土壤孔隙度越大,土壤连通性也越好,进而有利于提高土壤饱和导水率。研究结果表明黏粒含量、粉粒含量与饱和导水率呈正相关,而砂粒含量与饱和导水率

呈负相关,吴四平等^[20]的研究结果中也表明了这一点,土壤饱和后,非毛管孔隙是水分传输的重要通道,砂粒含量越多,土壤团聚体对砂粒的固定作用减弱,使细砂堵塞孔隙,且砂粒含量越高土壤导水能力越差。但张益等^[21]的研究结果表明土壤饱和导水率与土壤质地之间的关系不显著,造成这种差异的原因可能是其研究区位于北京山区,成土母质及土壤性质与本研究区存在明显区别,本研究区土壤粉粒含量最多,而在其研究中砂粒含量显著高于粉粒,故而呈现出不同的研究结果。由此说明不同研究区饱和导水率与土壤质地的相关关系存在差异,土壤质地在不同研究区饱和导水率的差异性表现中起到了关键作用。

本研究区的土壤 K_s 在不同土地利用方式下的平均大小表现为:草地 > 园地 > 耕地,这与王紫薇

等^[22]的研究结果相似。研究区内草地种植的空心莲子草为深根性植物,根系分布广泛,导致优先流等大孔隙流入参加剧;实地考察时发现草地土壤受外界干扰较小,土壤肥力较好,实测也显示草地的有机质含量更大(平均值为 20.75 g/kg),从而使草地的饱和导水率更高。园地中种植的多为柑橘,属经济作物,受各种农事活动影响,在管理过程中林地草本多被破坏,表层缺乏枯枝落叶层保护,因而饱和导水率比草地的小。本研究区耕地受到长期耕作和小型农机设施的影响,对表层土壤产生明显压实作用,土壤容重较大,从而导致土壤孔隙度减小,同时土壤的渗透能力减弱,因而饱和导水率小。杨震等^[9]研究的饱和导水率空间分布特征表明不同土地利用方式下 K_s 由高到低顺序为:林地>农地>草地,与本文的研究结果存在较大差异。究其原因为其所选林地的植被覆盖度高,土壤蓄水能力强,而草地由于退化、放牧等原因存在地表板结等问题,土壤渗透性差。3 种土地利用类型下土壤饱和导水率变异程度较大,其中耕地 K_s 值变异性在各土地利用方式中最高,园地和草地次之。耕地受耕作等农事活动影响,饱和导水率变化大,而研究区草地和园地受人为干扰少,地表扰动小,因而 K_s 变异度小于耕地。相较于刘春利等^[23]的研究,本研究区 K_s 的变异性更大,由此说明不同研究区饱和导水率的分布特征存在一定差异,有关三峡库区典型农业小流域饱和导水率的研究不可或缺。

3.2 不同土壤饱和导水率传递函数对比

研究结果表明,运用 Cosby, Saxton, Wosten, Puckett 这 4 种传递函数对 K_s 的预测结果都不太理想。具体分析可知,不同模型建立的基础条件有差异,本研究区土壤饱和导水率与容重、有机质含量、饱和含水量、土壤质地均呈现相关,以往研究所构建的传递函数模型中选择的输入变量在本研究区内不具有较强的适应性。孙丽等^[24]的研究证实了这一点。此外,传递函数的建立方法可能也会影响其精度,以往研究多采用线性回归来构建传递函数模型,但有研究表明采用非线性方程预测的土壤饱和导水率精度更高^[25]。本流域存在众多不确定因素均会对饱和导水率产生影响,且在不同研究区内影响饱和导水率的因素及其影响程度也不尽相同,因此重新构建适用于本研究区的土壤传递函数对流域水文侵蚀过程的研究具有切实意义。

结果显示通过 BP 神经网络和 SVM 构建的土壤传递函数精度较高,拟合效果较好,而通过多元线性回归方法构建的传递函数预测结果较差,不适用于本研究区,冯正江等^[26]的研究结果也证实了这一点,这

与 BP 神经网络和 SVM 捕获土壤饱和导水率与土壤理化性质之间复杂非线性关系的能力有关。这些模型可以通过更改重要参数(例如 BP 神经网络的迭代次数和隐藏层节点及支持向量机的核函数和参数)来进一步优化,以获得更准确的预测。但线性模型的预测能力有限,因为它们只是假设 K_s 与所涉及的因子之间的函数关系,因此,BP 神经网络和 SVM 的整体预测性能比线性模型更好一些^[27]。多项研究也表明,BP 神经网络和 SVM 在预测土壤水力参数方面取得了良好的效果,其中 SVM 的预测精度优于 BP 神经网络^[28]。除此之外,把经过主成分分析的土壤理化性质作为输入变量的传递函数预测精度更高,廖凯华等^[29]的研究中也表明了这一点,究其原因可能是采用主成分分析时各参数间的相关性被消除,这样既减少了网络的输入维数又保留了大部分信息,还降低了网络拓扑的复杂度。

邹刚华等^[30]的研究结果表明土壤 K_s 与土壤质地的相关性不大,寇青青等^[31]的研究则采用有机质含量、饱和含水量、黏粒含量作为输入变量,这表明土壤饱和导水率在不同区域的影响因素是不一样的。而夏子书等^[32]根据研究区复杂的地形特征,将高程、坡度、坡向等一系列地形因子作为输入变量来预测饱和导水率。Yao Rongjiang 等^[33]发现土壤盐度对沿海农田的饱和导水率影响较大,因此将其作为输入变量之一来构建土壤传递函数,预测效果良好。本研究最终选定容重、有机质含量、饱和含水量、土壤质地作为输入变量来预测饱和导水率,与以往研究^[30-31]结果中预测饱和导水率的输入变量存在一定差异,这是由于各研究区具有不同的土壤性质及外部环境所带来的。选择合适的参数作为传递函数的输入变量,既能更好理解各土壤理化性质与饱和导水率之间的关系,又能够有效提高模型的预测精度。因此在今后的研究中,可结合研究区实际,将饱和导水率与植被覆盖、地形特征、土壤化学性质等因素相结合以优化传递函数模型。

4 结论

不同土地利用方式对土壤 K_s 的大小有一定的影响。本研究区的土壤 K_s 在不同土地利用方式下的平均大小表现为:草地>园地>耕地,土壤 K_s 在不同土地利用类型间存在显著差异。土壤饱和导水率与容重、饱和含水量、有机质含量、土壤质地呈现极显著相关关系。将上述土壤基本理化性质作为输入变量,通过 BP 神经网络和支持向量机构建的饱和导水率传递函数模型能满足本研究区 K_s 预测要求

($R^2 > 0.714$), 且当输入层变量为经过主成分分析后得到的第一和第二主成分时, 预测效果最好。而以往常采用的土壤传递函数模型 (Cosby, Saxton, Wosten, Puckett) 不适用于本研究区饱和导水率的预测。

参考文献 (References)

- [1] Bouma J. Using soil survey data for quantitative land evaluation [M]. Stewart B A. *Advances in Soil Science*. New York: Springer, 1989:177-213.
- [2] Van Looy K, Bouma J, Herbst M, et al. Pedotransfer functions in earth system science: Challenges and perspectives [J]. *Reviews of Geophysics*, 2017, 55(4): 1199-1256.
- [3] 赵亚丽, 王云强, 张兴昌, 黄土高原生态工程区土壤容重及饱和导水率的分布特征[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(10): 83-89.
Zhao Yali, Wang Yunqiang, Zhang Xingchang. Distribution characteristics of bulk density and saturated hydraulic conductivity in intensive land restoration project areas on the Loess Plateau [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(10): 83-89.
- [4] 刘目兴, 吴丹, 吴四平, 等. 三峡库区森林土壤大孔隙特征及对饱和导水率的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(11): 3189-3196.
Liu Muxing, Wu Dan, Wu Siping, et al. Characteristic of soil macropores under various types of forest coverage and their influence on saturated hydraulic conductivity in the Three Gorges reservoir area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(11): 3189-3196.
- [5] 康文蓉, 张勇勇, 赵智智, 等. 荒漠绿洲过渡带土壤饱和导水率的空间变异特征[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(5): 137-143.
Kang Wenrong, Zhang Yongyong, Zhao Wenzhi, et al. Spatial variation characteristics of soil saturated hydraulic conductivity in a desert-oasis ecotone [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(5): 137-143.
- [6] 孙志祥, 崔俊芳, 杨汝馨, 等. 横断山区森林土壤饱和导水率传递函数的评价与构建研究[J]. *土壤*, 2022, 54(3): 594-601.
Sun Zhixiang, Cui Junfang, Yang Ruxin, et al. Evaluation and construction of pedo-transfer function of saturated hydraulic conductivity of forest soils in Hengduan Mountain region [J]. *Soils*, 2022, 54(3): 594-601.
- [7] 付同刚, 陈洪松, 王克林. 喀斯特小流域土壤饱和导水率垂直分布特征[J]. *土壤学报*, 2015, 52(3): 538-546.
Fu Tonggang, Chen Hongsong, Wang Kelin. Vertical distribution of soil saturated hydraulic conductivity in a small karst catchment [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(3): 538-546.
- [8] 施枫芝, 赵成义, 叶柏松, 等. 基于 PTFs 的干旱地区土壤饱和导水率的尺度扩展[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(6): 1584-1589.
Shi Fengzhi, Zhao Chengyi, Ye Baisong, et al. The scaling-up of soil saturated hydraulic conductivity based on PTFs in arid area [J]. *Journal of Desert Research*, 2014, 34(6): 1584-1589.
- [9] 杨震, 黄萱, 余冬立. 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[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(6): 178-184.
Yang Zhen, Huang Xuan, She Dongli. Spatial distribution characteristics and influencing factors of soil saturated hydraulic conductivity in the Loess Hilly Region of northwestern Shanxi [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(6): 178-184.
- [10] Zhan Jiang, Li Zhiping, Yu Xiaopeng, et al. Pedotransfer functions of the soil water characteristic curves of the vadose zone in a typical alluvial plain area in the lower reaches of the Yellow River using machine learning methods [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2022, 194(12): 850.
- [11] Vapnik V N, Lerner A Y, Chervone A Y. Learning systems for pattern recognition using generalized portraits [J]. *Engineering Cybernetics*, 1965(1): 63.
- [12] Cortes C, Vapnik V. Support-vector networks [J]. *Machine Learning*, 1995, 20(3): 273-297.
- [13] Cosby B J, Hornberger G M, Clapp R B, et al. A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils [J]. *Water Resources Research*, 1984, 20(6): 682-690.
- [14] Saxton K E, Rawls W J, Romberger J S, et al. Estimating generalized soil-water characteristics from texture [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(4): 1031-1036.
- [15] Wösten J. Pedotransfer functions to evaluate soil quality [J]. *Developments in Soil Science*. Vol. 25. Elsevier, 1997, 221-245.
- [16] Puckett W E, Dane J H, Hajek B F. Physical and mineralogical data to determine soil hydraulic properties [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1985, 49(4): 831-836.
- [17] 邓佳楠, 张军, 刘泽彬, 等. 六盘山华北落叶松坡面土壤饱和导水率空间异质性及其影响因素[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(5): 144-148.
Deng Jianan, Zhang Jun, Liu Zebin, et al. Spatial heterogeneity of soil saturated hydraulic conductivity and its influencing factors on a larch plantation hillslope in Liupan Mountain [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(5): 144-148.

- [18] 许振欣,邓羽松,林立文,等.南亚热带典型人工林土壤饱和和导水率特征及其影响因素研究[J].北京林业大学学报,2021,43(4):100-107.
Xu Zhenxin, Deng Yusong, Lin Liwen, et al. Characteristics of soil saturated hydraulic conductivity and its influencing factors of typical plantations in south subtropical zone [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021,43(4):100-107.
- [19] 姚荣江,杨劲松,张同娟,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.
Yao Rongjiang, Yang Jinsong, Zhang Tongjuan, et al. Influencing factors and pedo-transfer functions of topsoil saturated hydraulic conductivity in the coastal farmlands of reclaimed tidal flats [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014,22(7):790-797.
- [20] 吴四平,刘目兴,易军,等.三峡库区典型山地土壤的饱和和导水率及其影响因素研究[J].灌溉排水学报,2016,35(S2):55-58.
Wu Siping, Liu Muxing, Yi Jun, et al. Study on saturated hydraulic conductivity and its influencing factors of typical mountainous soil in Three Gorges reservoir area [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016,35(S2):55-58.
- [21] 张益,林毅雁,贾国栋,等.北京山区典型植被类型土壤饱和和导水率及其影响因素[J].水土保持学报,2022,36(6):171-178.
Zhang Yi, Lin Yiyuan, Jia Guodong, et al. Soil saturated hydraulic conductivity and its influencing factors of typical vegetation types in Beijing mountainous area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(6):171-178.
- [22] 王紫薇,邵明安,黄来明,等.青海省东部不同土地利用方式下土壤饱和和导水率分布及其影响因素[J].水土保持学报,2021,35(3):150-155.
Wang Ziwei, Shao Ming'an, Huang Laiming, et al. Distribution and influencing factors of soil saturated hydraulic conductivity under different land use patterns in Eastern Qinghai Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(3):150-155.
- [23] 刘春利,胡伟,贾宏福,等.黄土高原水蚀风蚀交错区坡地土壤剖面饱和和导水率空间异质性[J].生态学报,2012,32(4):207-215.
Liu Chunli, Hu Wei, Jia Hongfu, et al. Spatial heterogeneity of soil saturated hydraulic conductivity on a slope of the wind-water erosion crisscross region on the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012,32(4):207-215.
- [24] 孙丽,刘廷玺,段利民,等.科尔沁沙丘—草甸相间地区表土饱和和导水率的土壤传递函数研究[J].土壤学报,2015,52(1):68-76.
Sun Li, Liu Tingxi, Duan Limin, et al. Prediction of saturated hydraulic conductivity of surface soil in sand-dune-and-meadow interlaced region of horqin with pedo-transfer functions method [J]. Acta Pedologica Sinica, 2015,52(1):68-76.
- [25] 王子龙,常广义,姜秋香,等.灰色关联及非线性规划法构建传递函数估算黑土水力参数[J].农业工程学报,2019,35(10):60-68.
Wang Zilong, Chang Guangyi, Jiang Qiuxiang, et al. Constructing pedo-transfer functions based on grey relational and nonlinear programming to estimate hydraulic parameters in black soil [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019,35(10):60-68.
- [26] 冯正江,聂卫波,余淼,等.多尺度土壤入渗特性的变异特征和传递函数构建[J].农业工程学报,2022,38(13):64-75.
Feng Zhengjiang, Nie Weibo, Yu Miao, et al. Multiple scale variability of soil infiltration characteristics and establishment of pedo-transfer function [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022,38(13):64-75.
- [27] Deng Ying, Zhou Xiaoling, Shen Jiao, et al. New methods based on back propagation (BP) and radial basis function (RBF) artificial neural networks (ANNs) for predicting the occurrence of haloalkanes in tap water [J]. Science of the Total Environment, 2021,772:145534.
- [28] Sanuade O A, Hassan A M, Akanji A O, et al. New empirical equation to estimate the soil moisture content based on thermal properties using machine learning techniques [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020,13(10):377.
- [29] 廖凯华,徐绍辉,吴吉春,等.基于 PCR 和 ANN 构建的土壤转换函数的适用性研究[J].灌溉排水学报,2014,33(1):17-21.
Liao Kaihua, Xu Shaohui, Wu Jichun, et al. Evaluation of pedotransfer functions based on the principal component regression and artificial neural network [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014,33(1):17-21.
- [30] 邹刚华,李勇,李裕元,等.亚热带小流域稻田土壤饱和和导水率传递函数构建[J].土壤通报,2013,44(2):302-307.
Zou Ganghua, Li Yong, Li Yuyuan, et al. Developing a pedo-transfer function for estimating saturated soil hydraulic conductivity of paddy soils of a catchment in southern subtropical China [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013,44(2):302-307.

- tion on soil erosion in small watersheds under “7·26” extreme rainstorm in Zizhou County, Northern Shaanxi Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(4): 338-344.
- [4] 高健健, 党维勤, 周子渊, 等. 西吉县 2022 年“7·15”暴雨重力侵蚀调查与建议[J]. *人民黄河*, 2024, 46(6): 109-112.
Gao Jianjian, Dang Weiqin, Zhou Ziyuan, et al. Investigation and consideration on gravity erosion during July 15, 2022 rainstorm in Xiji County [J]. *Yellow River*, 2024, 46(6): 109-112.
- [5] 李天毅, 戴宁, 丛佩娟, 等.“23·7”京津冀地区暴雨洪水与土壤侵蚀调查: 以河北省邢台市临城县为例[J]. *水土保持通报*, 2024, 44(2): 155-166, 214.
Li Tianyi, Dai Ning, Cong Peijuan, et al. “23·7” Storm flood and soil erosion survey in Beijing-Tianjin-Hebei region: A case study of Lincheng County, Xingtai City, Hebei Province [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(2): 155-166, 214.
- [6] 林祚顶, 刘宝元, 丛佩娟, 等. 山东临朐 2019 年“8·10”特大暴雨水土保持调查[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(1): 149-153.
Lin Zuoding, Liu Baoyuan, Cong Peijuan, et al. Soil and water conservation survey after a heavy storm on 10th August, 2019 in Linqu, Shandong Province [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(1): 149-153.
- [7] 刘沛妤. 郑州“7·20”特大暴雨大坡小流域水土流失灾害调查与评价[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2023.
Liu Peiyu. Investigation and evaluation of soil and water loss disaster in Zhengzhou “7·20” heavy rainstorm slope small watershed [D]. Tai'an, Shandong: Shandong Agricultural University, 2023.
- [8] 乔殿新, 柳庆斌, 党恬敏, 等. 场次暴雨水土保持调查探索与思考[J]. *中国水土保持*, 2021(10): 13-15.
Qiao Dianxin, Liu Qingbin, Dang Tianmin, et al. Exploration and consideration on soil and water conservation survey of rainstorm event [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2021(10): 13-15.
- [9] 乔殿新, 苏新宇. 新阶段全国水土流失动态监测工作探析[J]. *中国水土保持*, 2022(4): 1-4.
Qiao Dianxin, Su Xinyu. The national dynamic monitoring work of soil and water loss in the new stage [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2022(4): 1-4.
- [10] 张雪宁, 董志嫻治理保护项目庆城县项目区水土流失典型调查及防治对策[J]. *甘肃农业*, 2014(23): 123-125.
Zhang Xuening. Typical investigation and control countermeasures of soil erosion in Qingcheng County project area of Dongzhixuan treatment and protection project [J]. *Gansu Agriculture*, 2014(23): 123-125.
- [11] Baoyuan L, Keli Z, Yun X. An Empirical Soil Loss Equation [C]. Beijing: Proceedings 12th International Soil Conservation Organization Conference, 2002.
- [12] 杨勤科, 李锐, 曹明明. 区域土壤侵蚀定量研究的国内外进展[J]. *地球科学进展*, 2006, 21(8): 849-856.
Yang Qinke, Li Rui, Cao Mingming. Advances of quantitative assessment on regional soil erosion [J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(8): 849-856.
- [13] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. *地理科学*, 2002, 22(6): 705-711.
Zhang Wenbo, Xie Yun, Liu Baoyuan. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(6): 705-711.
- [14] Matheron G. Principles of geostatistics [J]. *Economic Geology*, 1963, 58(8): 1246-1266.
- [15] 王宏广. 中国耕作制度 70 年[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
Wang Hongguang. 70 Years of China's Farming System [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005.
- [16] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准: SL190—2007[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. SL190-2007 Soil Erosion Classification and Grading Standard [S]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2008.
- ~~~~~
- (上接第 91 页)
- [31] 寇青青, 运剑苇, 汪明星, 等. 渝东北紫色土饱和和导水率传递函数研究[J]. *土壤*, 2020, 52(3): 611-617.
Kou Qingqing, Yun Jianwei, Wang Mingxing, et al. Study on pedotransfer function of saturated hydraulic conductivity of purple soil in Northeast Chongqing [J]. *Soils*, 2020, 52(3): 611-617.
- [32] 夏子书, 白一茹, 王幼奇, 等. 基于 GIS 和随机森林算法的宁东土壤饱和和导水率分布与预测[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(1): 285-293.
Xia Zishu, Bai Yiru, Wang Youqi, et al. Distribution and prediction of soil saturated hydraulic conductivity in ningdong based on GIS and random forest algorithm [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(1): 285-293.
- [33] Yao Rongjiang, Yang Jingsong, Wu Danhua, et al. Evaluation of pedotransfer functions for estimating saturated hydraulic conductivity in coastal salt-affected mud farmland [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(4): 902-916.