



推荐阅读:

[智能化煤矿分类、分级评价指标体系](#)

[煤矿智能化标准体系框架与建设思路](#)

[煤矿智能化\(初级阶段\)研究与实践](#)

[综采工作面煤层装备联合虚拟仿真技术构想与实践](#)

[煤矿井下随钻测量定向钻进技术与装备现状及展望](#)

[智慧煤矿主体架构设计与系统平台建设关键技术](#)

[虚拟现实技术在煤矿领域的研究现状及展望](#)

[德国工业 4.0 与中国煤机装备智能制造的发展](#)

[智慧煤矿与智能化开采技术的发展方向](#)

[智能矿井安全生产大数据集成分析平台及其应用](#)

[基于 TOA 压缩感知的矿井分布式目标定位方法](#)

[松软突出煤层瓦斯抽采钻孔施工技术及发展趋势](#)

[我国煤层气钻井技术及装备现状与展望](#)

[煤矿井孔钻进技术及发展](#)

[2311m 顺煤层超长定向钻孔高效钻进技术](#)

[我国煤矿区钻进技术装备发展与应用](#)

[煤矿井下人员精确定位方法](#)

[智慧矿山建设架构体系及其关键技术](#)

[矿山工程信息物理系统研究及挑战](#)

[智能化无人开采系列关键技术之一——综采智能化工作面调斜控制技术研究](#)



移动扫码阅读

王鑫,肖武,刘慧芳.锡林浩特矿区土壤水分特征曲线和有效含水量预测[J].煤炭科学技术,2020,48(4):169-177. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.04.018

WANG Xin, XIAO Wu, LIU Huifang. Soil moisture characteristic curve and prediction of available water content of overburden in Xilinhot Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(4): 169-177. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2020.04.018

锡林浩特矿区土壤水分特征曲线和有效含水量预测

王鑫¹,肖武²,刘慧芳¹,赵艳玲¹,田帅帅¹,邹玉珠¹

(1.中国矿业大学(北京)土地复垦与生态重建研究所,北京 100083;2.浙江大学公共管理学院,浙江 杭州 310058)

摘要:露天矿开采导致大面积的地貌改变和植被破坏,进行土地复垦是重建原有生态系统的有效手段。为改善锡林浩特矿区生态脆弱、且矿区表土稀缺的现状,利用上覆岩层进行表土替代材料的开发,上覆岩层土壤的持水能力是选择表土替代材料的重要指标,对于指导排土场复垦具有重要意义。基于此选取了AP(Arya and Paris模型)、MV(Mohammadi and Vanclooster模型)和MVVG(MV model with the van Genuchten模型)3种模型对锡林浩特矿区上覆岩层(L1—L5,共5层)土壤水分特征曲线与土壤有效含水量的预测精度。结果显示:MVVG对于土壤水分特征曲线($R^2=0.940$)与有效含水量($R^2=0.7409$)的预测精度均较好,AP对于土壤水分特征曲线的预测结果最好($R^2=0.950$),且对于剖面有效含水量的预测趋势与实测值一致,但是有效含水量的预测值与实测值 R^2 较低($R^2=0.491$),MV预测结果最差。AP模型对壤质沙土、砂之壤土和粉砂壤土的水分特征曲线预测效果好于MV和MVVG,但是各模型对沙土的预测效果均较差。除L5层,其余4层随着土壤层次深度的增加,其田间持水量、凋萎系数和有效水含量均呈减少趋势。L2—L4的有效水含量均低于L1(18%),且L4(8%)<L3(11%)<L2(15%)。研究结果显示AP和MVVG模型可以准确地预测研究区土壤水分特征曲线和水分常数,适合用于锡林浩特矿区上覆岩层土壤持水能力的预测。同时结果表明,L5层的有效含水量最大(20%),且土层较厚,具有在土地复垦过程中作为表土替代材料的潜力,而L2—L4可以考虑作为中和L5质地过黏的材料,使其土质更加接近腐殖层土壤(L1)。

关键词:土地复垦;土壤重构;水分特征曲线;土壤有效水

中图分类号:TD88;X703

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2020)04-0169-09

Soil moisture characteristic curve and prediction of available water content of overburden in Xilinhot Mining Area

WANG Xin¹, XIAO Wu², LIU Huifang¹, ZHAO Yanling¹, TIAN Shuaishuai¹, ZOU Yuzhu¹

(1. Institute of Land Reclamation and Ecological Restoration, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. School of Public Affairs, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Topsoil is stripped away by open-pit mining which resulting in large-scale landform changes and vegetation damage. Land reclamation is an effective ways of reconstructing the original ecosystem. The eastern part of Inner Mongolia is fragile and the topsoil is scarce. It is great significance to try to use the overburden to carry out the development of topsoil alternative materials. The water holding capacity of overburden is an important indicator for selecting as topsoil alternative materials, which is useful for guiding the reclamation of the dumping site. However, the direct measurement of soil water characteristic curve is costly and time-consuming. This paper compares the prediction accuracy of soil water characteristic curve and soil available water content in overburden (L1—L5, 5 layers) by AP (Arya and Paris model), MV (Mohammadi and Vanclooster model) and MVVG (MV model with the van Genuchten). The results showed that MVVG had better prediction accuracy for soil water characteristic curve ($R^2=0.940$) and effective water content ($R^2=0.7409$), and AP had the best prediction result for soil water characteristic curve ($R^2=0.950$), but it was lower for predicting effective water content ($R^2=0.4908$) and the predicted results of MV and UNSODA were poorest. The prediction performance of AP model on loamy sand, sandy loam

收稿日期:2019-09-28;责任编辑:赵瑞

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0501103)

作者简介:王鑫(1992—),男,山东潍坊人,博士研究生。E-mail: wangxinht@163.com

通讯作者:肖武(1983—),男,湖南涟源人,研究员,博士生导师,博士。E-mail: xiaowuw@126.com

and silt loam in SWCC was better than MV and MVVG, but the prediction performance of all models on sand soil was poor. In addition to the L5 layer, the remaining four layers showed a decreasing trend in field water holding capacity, wilting coefficient and effective water content as the depth of the soil layer increased. Moreover, the effective water content of L2—L4 was lower than L1 (18%), and L4 (8%) < L3 (11%) < L2 (15%). Through comparative analysis, this paper considered that the prediction results of MVVG and AP were relatively accurate, and it was suitable for the prediction of soil water holding capacity of overburden. At the same time, the results showed that the L5 layer had the largest effective water content (20%) and had the potential as topsoil alternative materials, and L2—L4 could be used as a material that neutralizes stickiness of L5 to bring the soil texture closer to the humus soil (L1).

Key words: land reclamation; soil reconstruction; water characteristic curve; soil available water

0 引言

露天开采活动需要对煤层上方的表土和岩层全部进行剥离,由于表土资源对于植被恢复极为重要,通常会堆存到指定场地,并采取保护措施,待到煤层开采过后再进行回填^[1-3]。即使如此,由于上述过程涉及剥离—搬运—堆存—回填等多个环节^[4],不可避免地会造成表土资源的损失和退化。因此回填的表土资源通常较未剥离前的表土质量差并伴随土量损失^[5-10]。东部草原区表土层较薄,以内蒙古锡林浩特市北电胜利露天矿为例,表土层一般不超过30 cm,此外露天矿的外排土场由多级平台和边坡组成,需要覆盖的面积增加^[11],加大了对表土的需求量,使得堆存表土难以满足排土场表层覆盖的需要。为了解决这一问题,有关学者提出将煤炭开采中产生的剥离基质进行人工改良,使其熟化后成为理想的表土替代材料^[12-13],NICOLINI等^[14]发现经风化的黄土作为表土替代材料时植被恢复效果明显,类似的方式也被SENA等^[15]采用,其使用风化后的褐色砂岩作为矿区土地复垦的表土替代材料。胡振琪等^[16]对内蒙古某露天煤矿的上覆岩层土层的基本特征进行分析,通过室内试验筛选出亚黏土较为适宜作为表土替代材料。被剥离的上覆岩层通常作为排土场原有腐殖土层的主要替代材料用于表层覆盖。但是这些经剥离、无序堆存的上覆岩层材料在用于排土场复垦时,其持水效果通常较原生土壤差,植被难以获取生长所需水分^[17],使得预期的植被恢复效果难以实现。因此调查用于矿区复垦的上覆岩层各层次土壤的持水能力成为选择表土替代材料的重要依据之一。

土壤有效含水量(Soil Available Water, AW)是土壤持水能力的一个重要指标^[18],是指处于土壤田间持水量(Field Capacity, FC)和凋萎系数(Permanent Wilting Point, PWP)之间的可供植物利用的土壤水分,通常是利用土壤水分特征曲线(Soil Water Characteristic Curves, SWCC)计算田间持水量和永久萎蔫点的差值求得。但是试验测定SWCC

成本高耗时长,对于大中尺度区域的采样调查往往不实际,因此针对矿区土壤水力参数的研究并不常见,所以通过间接方法预测SWCC成为研究热点领域。经过多年发展,许多学者基于不同的理论基础提出了各种间接预测方法^[19]。目前广泛应用的SWCC预测方法主要有2种^[20]:①土壤转换函数(PTF),包括通过估计特定基质势下水分含量,从而预测土壤水分特征曲线的点估计(Point-based PTF)方法,以及通过估计土壤水分特征曲线解析式参数(如VG公式^[21]的参数 α 、 n 等)的参数估计(Parameter-based PTF)方法;②通过假设的土壤结构模型预测SWCC的物理概念方法(如AP模型、MV模型)^[22]。模型由Arya和Paris于1981年首次提出^[23-25],MV模型则是由MOHAMMAD和VAN-CLOOSTER于2011年提出^[26],并于2014年提出了改进模型,即MVVG^[27]模型(具体介绍见第1.3节)。土壤转换函数PTF是用土壤中容易获得的参数建立土壤基质势和含水量的联系,从而获得SWCC^[28-30]。虽然PTF应用广泛,但是PTF的建立依赖于大量的训练数据并受限于区域,难以推广,而且目前大部分地区尚缺少充足的数据资料用来构建适合自身情况的预测方法,矿区更甚。而物理模型则是基于一定假设的基础上,利用土壤颗粒组成来计算土壤的孔隙结构,从而预计土壤水分特征曲线,相比于PTF,物理模型不需要前期大量的数据收集,适用性更强。因此选择目前代表性的SWCC间接预测方法:AP模型、MV模型以及MV改进模型MVVG用于预测土壤的水分特征曲线和土壤有效水分含量。通过比较不同模型对不同质地土壤水分特征曲线的预测能力,选择一个合适的模型预测土壤有效水分,并以此评估锡林浩特矿区上覆岩层土壤的持水能力。笔者利用以上3种模型对水分特征曲线和水分常数均进行了预测分析,得出适合锡林浩特矿区水力参数的预测方法,同时对上覆岩层各层次的持水能力进行了评价,对表土替代材料的筛选具有参考价值。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古锡林浩特市北电胜利露天矿,位于东经 $115^{\circ}30' \sim 116^{\circ}26'$,北纬 $43^{\circ}57' \sim 44^{\circ}14'$ 。地势西高东低,总体较为平坦,主要为草原植被。本区域属半干旱草原气候,年平均降水量 294.74 mm,蒸发量 1794.64 mm。每年的 6、7、8 三个月为雨季,占全年降水量的 71%。年平均气温 18.5°C ,生长季为 6—10 月。土壤类型主要由栗钙土、草甸栗钙土、草甸土等组成,研究区域位置如图 1 所示。



图 1 研究区域位置

Fig.1 Location of study area

本研究共调查了 6 个不同位置(S1—S6,具体位置如图 1 所示)的土壤上覆盖层剖面(图 2),分 2 次进行了调查,由于空间异质性的存在,6 个剖面的土壤层次厚度存有差异。以典型剖面 S4 为例,调查发现煤层上覆表土层次分明,结合矿区资料,共将其分为 5 层,第 1 层(L1)为腐植层,颜色偏褐棕色;第 2 层(L2)为黄土层,质地较细,但颜色较腐植层浅;第 3 层(L3)为壤质沙土,且该层含有较大的砂砾($>2\text{ mm}$);第 4 层(L4)为颗粒均匀的沙土层;第 5 层(L5)为粉砂壤土层,质地较粘。L4 和 L5 土层均较厚。S4 剖面土壤的主要性质见表 1。结果显示,各个层次土壤性质区别明显,除 L2 外,其余 L1 均为砂质壤土,L3 为壤质沙土,L4 为沙土,L5 为粉砂壤土。在 L2 的 6 个采样点中,有 4 个采样点显示 L2 为壤质沙土,2 个采样点为粉砂壤土。

1.2 样品采集与处理

调查发现东部草原区露天矿原始上覆岩层具有明显的层状结构,各层持水性差异较大,因此对矿区上覆岩层各层次土壤均进行采样,共 39 个,根据不同剖面的实际情况,对于部分剖面由于某些层次较厚,遂进行了分层采样。所有剖面 L1—L3 各取 1 组,L4 取 2 组,S1、S2 和 S3 的 L5 取 1 组,其余剖面取 2 组。

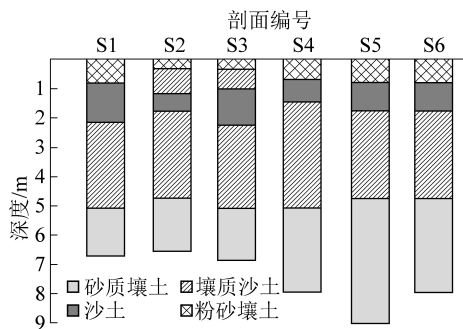


图 2 研究区土壤剖面示意

Fig.2 Soil profiles of study area

表 1 土壤颗粒分布和基本物理性质

Table 1 Soil particles distribution and basic physical properties of the studied soil

层次	质量分数/%			质地	容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
	粘粒	粉粒	沙粒		
L1	4.55	37.73	57.72	沙质壤土	1.23
L2	4.43	34.04	61.54	沙质壤土	1.59
L3	3.32	21.80	74.87	壤质沙土	1.72
L4	0.15	2.69	97.16	沙土	1.54
L5	7.44	71.72	20.83	粉砂壤土	1.22

每层用环刀法取原状土壤 4 组用于 SWCC (2 组)和容重(2 组)的测定,利用烘干称重法测定土壤容重(BD),使用粒径测试仪测定土壤颗粒级配,获得土壤粘粒(粒径 $<0.002\text{ mm}$)、粉粒($0.05 > \text{粒径} > 0.002\text{ mm}$)和沙粒(粒径 $>0.05\text{ mm}$)含量,利用压力膜法测定土样的水分特征曲线,采用 VG 公式对测定的土壤水分特征曲线进行拟合^[19],公式如下:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (uh)^n} \right]^m \quad (1)$$

式中: θ 为土壤含水量; θ_r 为土壤残余含水量; θ_s 为土壤饱和含水量; u 为与进气吸力相关的参数; n 、 m 为形状参数,一般 $m = 1 - 1/n$ 。

1.3 土壤水分特征曲线预测模型原理介绍

AP(Arya and Paris)模型是基于土壤颗粒分布与 SWCC 形状的相似性,于 1981 年由 Arya and Paris 提出^[22],另外 MV(Mohammadi and Vanclooster model)和 MVVG(MV model with the van Genuchten model)对于体积含水量的计算与 AP 模型是一致的,以上模型均由提出者的名字命名。AP 和 MV 以假定的土壤颗粒紧密规则排列模型为基础来研究土壤基质势与水的特性关系。将土壤颗粒分布曲线分成 n 段后(一般 $n = 20$ 段),假设土壤颗粒为规则球体,相应每段曲线对应的颗粒质量分数与平均颗粒半径分别为 w_i 和 R_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)。已知土

壤平均容重 ρ_b 和土粒密度 ρ_s , 通常 ρ_s 为 2.65 g/cm^3 , 则土壤孔隙比 $e = (\rho_s - \rho_b) / \rho_b$, 孔隙率 $P = 1 - \rho_b / \rho_s$, Arya 假设土壤饱和含水率与孔隙度的关系为 $\theta_s = 0.902P$, 则每段曲线对应的体积含水量 $\theta_i = \theta_s w_i$ ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)。

1.3.1 AP 模型

假设土壤孔隙为圆柱状, 则土壤孔隙的长度可以表示为 $2n_i R_i$, 其中 n_i 表示相应第 i 段曲线半径为 R_i 球形颗粒个数, 由于实际的土壤颗粒排列可能与假想结构不符, Arya 引入一个修正参数 α , 则每个排列模型中土壤颗粒数量修正为 n_i^α , 最初 α 对所有质地土壤的取值为常数 1.38 (或使用经验系数沙土、砂质壤土、壤土、粉砂壤土、黏土分别为 1.285、1.459、1.375、1.150、1.160, 其他质地土壤仍为 1.38)。随着 Arya 等进一步的研究, 提出利用逻辑生长曲线或线性拟合 2 种方法获得 α 值^[23], 笔者使用的是试验结果更好的逻辑生长曲线方法。该方法假设已知颗粒数量, 则相应的孔隙半径 $r_i = R_i \sqrt{2en_i^{1-\alpha_i}/6}$, 土壤基质势可表示为 $h_i = 2\sigma \cos \delta / (r_i \rho_w g)$, 本研究中, 取 $\sigma = 72 \text{ g/s}^2$, $\cos \delta = 1$, 水密度 $\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$, $g = 980 \text{ cm/s}^2$ 。

1.3.2 MV 与 MV-VG 模型

假想土壤颗粒总体积 $64 R_i^3$, 球体的颗粒体积为 $(32\pi R_i^3) / 3$ (图 3), 然而在实际结构中, 球形颗粒的个数可能大于 8 或小于 8, 引进参数 ξ , ξ 是一个表征土壤密实度的参数, 理论上 < 1.9099 , 则颗粒数量修正为 8ξ , 因此孔隙体积 $P_{vi} = 64 R_i^3 - (32\pi R_i^3) / 3$, 可求孔隙比 $e = (64 R_i^3 - P_{vi}) / P_{vi}$, 已知 $e = (\rho_s - \rho_b) / \rho_b$, 即 $\xi = 1.9099 / (1 + e)$ 。

颗粒横断面面积 $A_{pi} = 4 R_i^2 - \pi R_i^2 = 0.858 R_i^2$, 则 $h_i = C_{pi} \sigma \cos \delta / A_{pi} \rho_w g$, 其中 C_{pi} 为孔隙周长。根据 Mohammad 的研究, $\frac{C_{pi}}{A_{pi}} = \frac{7.318}{R_i} \xi$, 则 $h_i = \frac{7.318 \sigma \cos \delta}{R_i \rho_w g} = \frac{0.543 \times 10^{-2}}{R_i} \xi$ 。

Mohammad 于 2014 年通过引进比例系数 λ 提高了 MV 模型在土壤水分特征曲线高吸力段水分的预测精度, 并将 MV 模型融入 VG 模型, 形成 MV-VG 模型。

Mohammad 认为模型最大的密实系数 $\xi_{\max} = 1.41432$, 则任意土壤相对于最密实土壤的换算系数 $\lambda = \xi / \xi_{\max}$, 可以容易得出紧实土壤 ξ 较大, 松散土壤 ξ 较小。假设 VG 公式中的形状参数 n 受比例系数 λ 影响, 则 MV-VG 中 $n^* = \lambda n$, 因此改进的

MV-VG 模型为

$$\frac{\theta}{\theta_s} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^{n^*}} \right]^m \quad (2)$$

式中: θ_s 为饱和导水率; n, m 为 VG 公式的形状参数, $m = 1 - 1/n$ 。

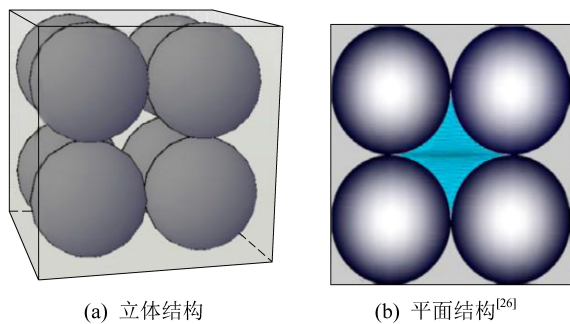


图3 土壤颗粒排列模型

Fig.3 Soil particle arrangement model

1.4 模型预测评价指标

通过比较实测值与预测值来评估 PTF 函数的模拟精度。选择均方根误差 E_r 、决定系数 R^2 、平均误差 E_m 从不同方面评价 PTF 函数的模拟性能: ①均方根误差 E_r 用来表征 PTF 整体的预测误差。②决定系数 R^2 用来表征预测值的离散程度, R^2 越大, 预测值对实测值的解释程度越高, 拟合优度越高。③平均误差 E_m 则主要用来表征 PTF 是否会对实测值的预测出现低估或者高估。本文中 R^2 和 E_m 都不作为独立的指标用来评价 PTF 模型精度。主要是因为这 2 个指标并没有提供能反映 PTF 预测精度的信息, 其次当 3 个评价指标在预测 PTF 表现出不同趋势时难以评价结果优劣, 因此选择均方根误差 E_r 作为本文中评价模型的主要统计指标。上述评价指标的表达公式为

$$E_r = \sqrt{(E_i - M_i)^2} \quad (3)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N [(E_i - \bar{E})(M_i - \bar{M})]^2}{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2 \sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2} \quad (4)$$

$$E_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_i - M_i) \quad (5)$$

式中: E_i 为模型预测值; M_i 为实测值; \bar{E} 为模型预测的平均值; \bar{M} 为实测的平均值; N 为数据数量。

2 结果分析与讨论

2.1 不同模型预测精度比较

AP、MV 和 MVVG 三种不同方法土壤水分预测值与实测值之间的关系如图 4 所示, 3 种方法的拟

合优度均较好,分别为 0.950、0.873、0.940。AP 模型的 E_r 在 3 种预测方法中最低($E_r=0.032$),并且 E_m 最小($E_m=-0.008$)。

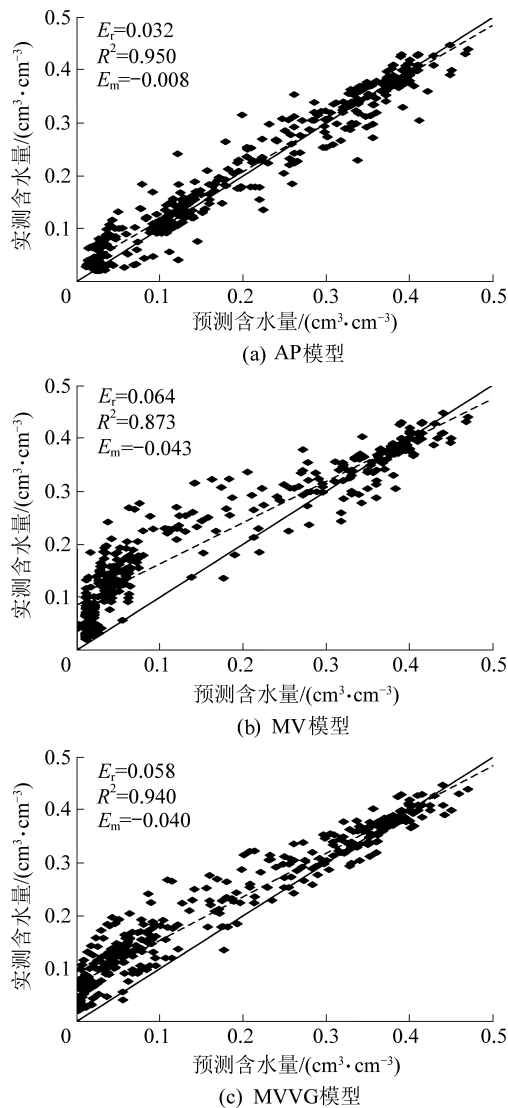


图 4 不同模型对 SWCC 的预测精度

Fig.4 Predicted accuracy of SWCC by different models.

从图 4 可以看出 AP 模型预测的大部分点集中在 1:1 线周围,表明其对数据预测没有出现明显的低估。MVVG 预测结果与 AP 相当,其中 E_r 为 0.058, MVVG 在高吸力段出现低估,尤其是在砂质壤土($E_m=-0.047$)中比较明显(表 2),但是正如 Mohammad 的研究所述^[27], MVVG 作为 MV 的改进模型,其预测精度比 MV 提高了 28.5%, MVVG 的预测精度也仅次于 AP 模型,模型精度较高。MV 预测结果最差。预测模型在高吸力段都会出现不同程度的低估,这一点 ARYA 和 MOHAMMAD^[26]都在文献中指出过, MVVG 也正是改进了 MV 在高吸力段对 SWCC 低估的缺点才得以提高精度。从不同质地来

看(表 2),不同方法对于不同质地的土壤预测效果并不相同(RMSE):MV(沙土>壤质沙土>粉砂壤土>沙壤土)、AP(粉砂壤土>沙壤土>沙土>壤质沙土)、MV-VG(沙土>壤质沙土>粉砂壤土>沙壤土), MVVG 作为 MV 的改进模型,其模型原理并没有发生变化,只是提高了 MV 在高吸力段的预测能力,因此这 2 个模型在对不同质地土壤的预测效果上表现出了一致性。

表 2 不同质地土壤水分特征曲线的评价指标

Table 2 Evaluation indexes of soil water characteristic curve of texturally different soils

土壤质地	模型	R^2	E_m	E_r
粉砂壤土	MV	0.964	-0.054	0.074
	AP	0.980	-0.010	0.019
	MVVG	0.976	-0.044	0.060
砂质壤土	MV	0.877	-0.070	0.090
	AP	0.956	-0.001	0.023
	MVVG	0.901	-0.047	0.067
沙土	MV	0.905	-0.027	0.056
	AP	0.927	-0.012	0.039
	MVVG	0.939	-0.032	0.050
壤质沙土	MV	0.937	-0.037	0.065
	AP	0.959	-0.004	0.045
	MVVG	0.975	-0.036	0.052

不同模型对不同质地土壤在不同基质势下的 E_m 如图 5 所示,进一步阐释了各模型对 SWCC 的预测能力。结果显示, AP 模型在粉砂壤土和砂质壤土表现出较好的预测精度,而 MV 和 MVVG 从基质势 330 kPa 开始低估土壤含水量, MVVG 的低估程度较 MV 小。各模型在沙土的表现较为一致, AP 略好于 MV 和 MVVG,但是结果显示各模型对土壤含水量的预测误差均较为离散,说明对沙土的预测效果并不稳定。壤质沙土中,各模型在 100~1000 kPa 之间的预测误差较大,在高吸力段和低吸力的预测能力各模型差距不大。总体而言, AP 模型在沙土质地土壤的表现较差,而 MVVG 和 MV 则在砂质壤土上的表现较差,模型的表现受到土壤质地的影响。同时从图 5 可以看出, 3 种模型的预测精度在高吸力段都会出现较大误差,这是由于受物理经验模型中数学表达的限制,数学公式难以表达土壤孔隙的孔-喉结构(如配位数、拓扑结构等),物理经验模型无法考虑较细孔隙对相连接的较粗孔隙可能引起的排水阻塞而造成低估,这一现象在较高吸力段较为明显。综合比较图 4 和图 5 结果, AP 和 MVVG 模型表现出相当的预测性能,预测结果较 MV 模型更好。

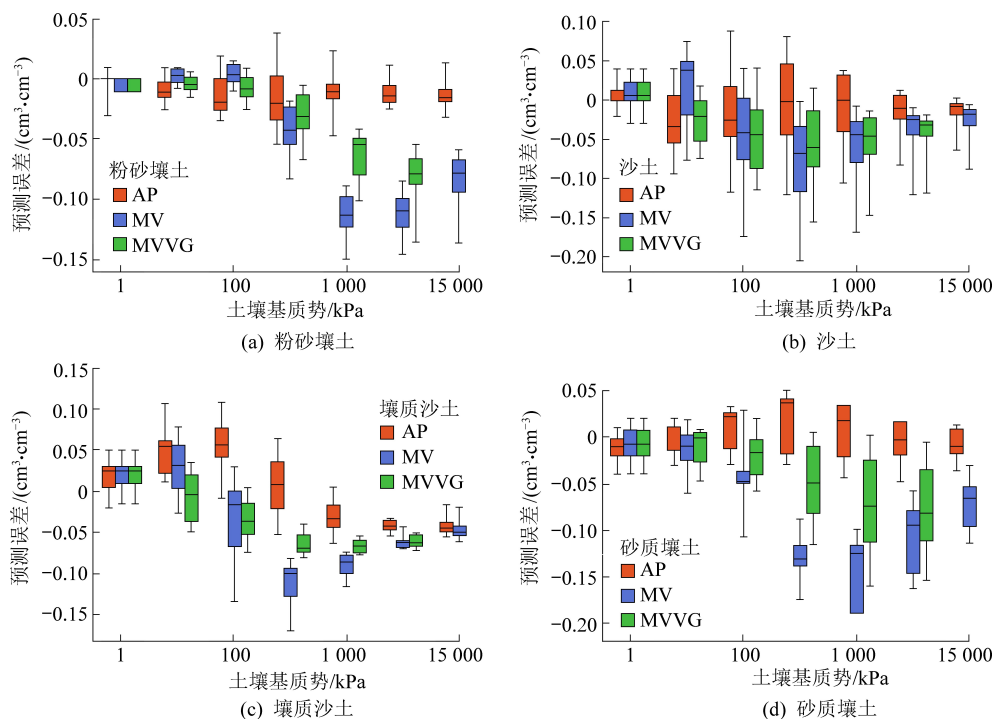
图 5 不同模型对不同质地土壤水分特征曲线的 E_m 比较

Fig.5 Predicted mean error comparison for SWCC of different soils by different models

2.2 水分常数预测精度比较

不同质地田间持水量和永久萎蔫点以及有效水含量预测结果见表 3。AP 模型在粉砂壤土、壤质沙土和砂质壤土上的田间持水量 (300 kPa) 预测效果好于 MV 和 MVVG 模型 (图 5)。对于沙土, 从中位数来看, 只有 AP 对田间持水量的预测接近实测值, 但是各模型的预测误差均呈离散趋势, 说明各模型对沙土田间持水量的预测效果较差。在凋萎系数 (15 000 kPa) 的估计方面, AP 模型均优于其他 3 种

模型。但是不同模型均出现整体性的低估, 这一原因在前文已经进行解释。

土壤有效水 (即田间持水量与永久萎蔫点之差) 估计方面, 从图 6 可以看出, MVVG 模型预测的 AW 值具有较高的 R^2 值和较低的 E_r 和 E_m 值, 对于 AW 的预测精度更高, 但是 AP 模型对 AW 的预测虽然也具有较小的 E_r , 但是其 R^2 值却较低。结果显示, 对于 SWCC 整体预测精度并不能反映在其对有效水含量的预测精度上。

表 3 不同质地土壤水分常数的预测指标

Table 3 Evaluation indexes of soil moisture constants of texturally different soils

项目	方法	壤质沙土	沙土	砂质壤土	粉砂壤土
田间持水量/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	MV	0.055±0.016	0.036±0.012	0.147±0.033	0.273±0.024
	AP	0.175±0.038	0.108±0.020	0.294±0.023	0.301±0.032
	MVVG	0.104±0.018	0.059±0.022	0.227±0.035	0.284±0.021
	实测值	0.168±0.027	0.115±0.062	0.277±0.043	0.315±0.015
凋萎系数/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	MV	0.016±0.005	0.011±0.005	0.041±0.013	0.039±0.009
	AP	0.020±0.005	0.023±0.007	0.106±0.012	0.109±0.021
	MVVG	0.006±0.007	0.002±0.002	0.042±0.020	0.040±0.007
	实测值	0.062±0.015	0.039±0.024	0.114±0.021	0.123±0.025
有效含水量/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	MV	0.039±0.014	0.025±0.008	0.106±0.040	0.234±0.020
	AP	0.154±0.034	0.086±0.017	0.188±0.017	0.192±0.027
	MVVG	0.098±0.012	0.057±0.020	0.185±0.026	0.244±0.018
	实测值	0.107±0.029	0.076±0.047	0.164±0.028	0.192±0.018

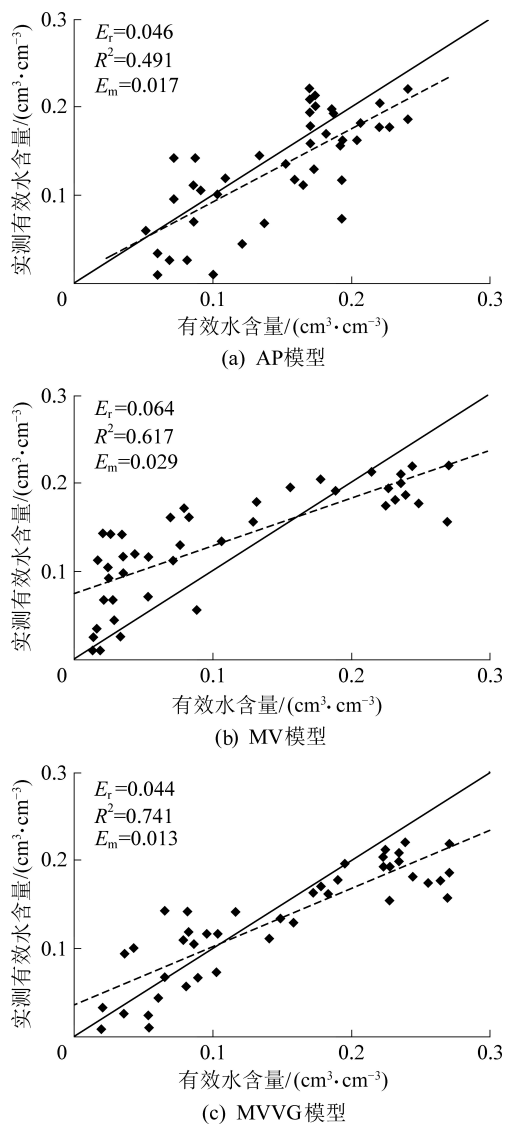


图6 不同模型对有效水含量的预测结果

Fig.6 Predicted results of available water content by different models

2.3 上覆岩层土壤持水性规律与分析

不同层次土壤的田间持水量、凋萎系数和有效水含量如图7所示,实测结果显示L5层的有效含水量最大(20%),意味着在相同情况下能为植被恢复提供更多可利用的水分,且L5土层较厚,储量丰富,除了L5层,其余4层随着土壤层次深度的增加,其田间持水量、凋萎系数和有效水含量均呈减少趋势。而且L2、L3和L4(15%、11%、8%)的有效水含量均低于L1(18%),从有效含水量来看,L5较适合作为表土替代材料,但是L5质地较粘(粘粒含量高),若直接用于表层覆盖,在机械压实的情况下,会导致植被难以扎根存活,需要进行熟化或者与质地较为松散的沙土(L4)进行混合。

从水分常数的变化趋势来看,各模型对田间持水量和有效含水量的预测,只有AP模型的预测趋

势与实测值相同,即AP模型和实测值的田间持水量和有效含水量均为 $L5>L1>L2>L3>L4$,同时只有MVVG对于凋萎系数的预测趋势与实测值相同($L1>L2>L5>L3>L4$),而AP模型的预测趋势则为 $L1>L2>L5>L4>L3$ 。但是由于凋萎系数通常接近0,因此田间持水量的预测精度对于准确计算有效含水量的影响较凋萎系数大,即使对凋萎系数的趋势预测与实测值不同,但是由于其绝对值小,对有效含水量的计算精度不会产生太大影响。AP模型对于有效含水量变化趋势的准确预测可能也与其在预测田间持水量时的最优表现有关。

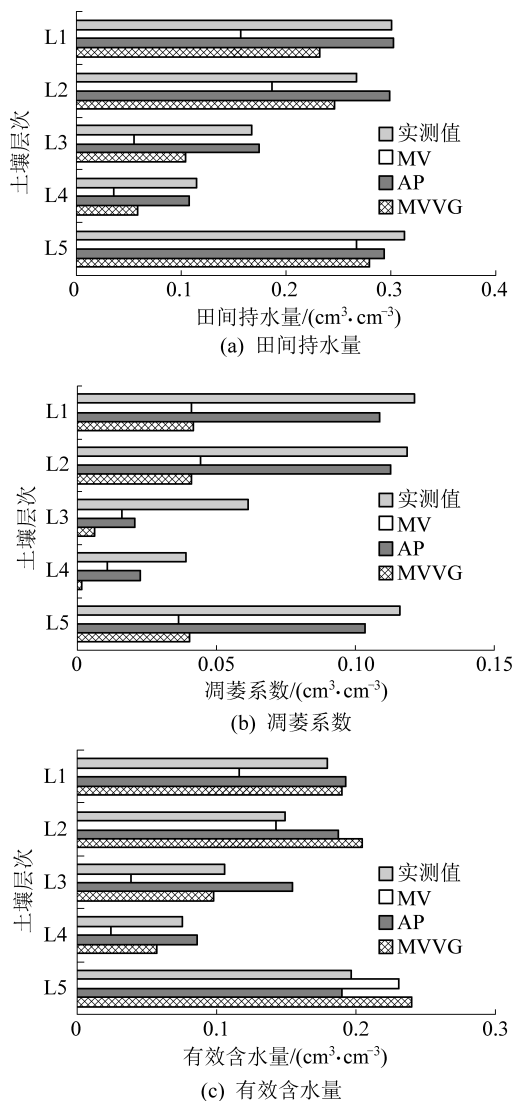


图7 各层土壤的水分常数

Fig 7 Moisture constant of each layer

3 结论

1)利用3种不同的模型对锡林浩特矿区的水力性质进行预测。结果显示AP和MVVG模型在整体SWCC的预测精度较高,AP模型在粉砂壤土、壤

质沙土和砂质壤土的预测效果好于MV和MVVG模型,但是各模型对于沙土的预测效果均不稳定,预测误差较为离散。

2)有效含水量的预测精度方面,MVVG的表现最好,其次是AP模型。AP模型对不同质地土壤田间持水量和凋萎系数的预测效果均好于MV和MVVG模型,但是各模型对凋萎系数的预测均有低估现象,同时各模型对沙土田间持水量的预测效果较其他质地土壤差。

3)通过对锡林浩特各层次土壤的水分常数进行评价,结果表明L5层次的土壤有效水含量最高,有在表土不足的情况下作为替代材料的潜力,同时L2—L4均较表土层持水量差,且 $L4 < L3 < L2$,不适合作为替代材料,但是可以作为中和L5质地过粘的材料。其中以储量最为丰富的L4最具有潜力,且其沙粒含量高,结构松散,质地均匀,预期改良效果最为明显。

参考文献(References):

- [1] 胡振琪,肖武,赵艳玲.再论煤矿区生态环境“边采边复”[J].煤炭学报,2020,45(1):351-359.
HU Zhenqi, XIAO Wu, ZHAO Yanling. Re-discussion on coal mine eco-environment concurrent mining and reclamation[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 351-359.
- [2] 卞正富,于昊辰,侯竞,等.西部重点煤矿区土地退化的影响因素及其评估[J].煤炭学报,2020,45(1):338-350.
BIAN Zhengfu, YU Haochen, HOU Jing, et al. Influencing factors and evaluation of land degradation of coal mine areas in Western China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 338-350.
- [3] 卞正富,雷少刚,金丹,等.矿区土地修复的几个基本问题[J].煤炭学报,2018,43(1):190-197.
BIAN Zhengfu, LEI Shaogang, JIN Dan, et al. Several basic scientific issues related to mined land remediation[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 190-197.
- [4] 李全生.东部草原区大型煤电基地开发的生态影响与修复技术[J].煤炭学报,2019,44(12):3625-3635.
LI Quansheng. Progress of ecological restoration and comprehensive remediation technology in large-scale coal-fired power base in the eastern grassland area of China[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(12): 3625-3635.
- [5] 王金满,郭伶俐,白中科,等.黄土区露天煤矿排土场复垦后土壤与植被的演变规律[J].农业工程学报,2013,29(21):223-232.
WANG Jinman, GUO Lingli, BAI Zhongke, et al. Succession law of reclaimed soil and vegetation on opencast coal mine dump of loess area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(21): 223-232.
- [6] 胡振琪,龙精华,王新静.论煤矿区生态环境的自修复、自然修复和人工修复[J].煤炭学报,2014,39(8):1751-1757.
HU Zhenqi, LONG Jinghua, WANG Xinjing. Self-healing, natural restoration and artificial restoration of ecological environment for coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1751-1757.
- [7] 肖武,胡振琪,李太启,等.采区地表动态沉陷模拟与复垦耕地率分析[J].煤炭科学技术,2013,41(8):126-128.
XIAO Wu, HU Zhenqi, LI Taiqi, et al. Dynamic subsidence simulation and land reclamation efficiency analysis of surface ground above mining block[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(8): 126-128.
- [8] 肖武,胡振琪,许献磊,等.煤矿区土地复垦成本确定方法.煤炭学报,2010,35(S0):175-179.
XIAO Wu, HU Zhenqi, XU Xianlei, et al. Cost definite method of land reclamation in coal mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(S0): 175-179.
- [9] 肖武,陈佳乐,胡振琪,等.高潜水位采煤沉陷地构建平原水库的可行性分析与实践[J].煤炭科学技术,2017,45(7):184-189.
XIAO Wu, CHEN Jiale, HU Zhenqi, et al. Feasibility analysis and practice of constructing plain reservoirs in high underground water mining subsidence area[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(7): 184-189.
- [10] XIAO Wu, HU Zhenqi, FU Yanhua. Zoning of land reclamation in coal mining area and new progresses for the past 10 years[J]. International Journal of coal Science & Technology, 2014, 1(3): 177-183.
- [11] 刘雪冉,胡振琪,许涛,等.露天煤矿表土替代材料研究综述[J].中国矿业,2017(3):32-35.
LIU Xueran, HU Zhenqi, XU Tao, et al. Summarizing research on topsoil substitute material of open-pit coal mine[J]. China Mining Magazine, 2017(3): 32-35.
- [12] 位蓓蕾,陈玉玖,胡振琪,等.紫花苜蓿对蛭石改良某煤矿表土替代材料的响应[J].金属矿山,2013(5):131-134.
WEI Beilei, CHEN Yujie, HU Zhenqi, et al. Response of purple alfalfa for vermiculite as material substitute modifying the surface soil of an open-pit mine[J]. Metal Mine, 2013(5): 131-134.
- [13] 胡振琪,多玲花,王晓彤.采煤沉陷地夹层式充填复垦原理与方法[J].煤炭学报,2018,43(1):198-206.
HU Zhenqi, DUO Linghua, WANG Xiaotong. Principle and method of reclaiming subsidence land with inter-layers of filling materials[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 198-206.
- [14] NICOLINI F, TOPP W. Soil properties in plantations of sessile oak (Quercus petraea) and red oak (Quercus rubra) in reclaimed lignite open-cast mines of the Rhineland[J]. Geoderma, 2005, 129(1/2): 70-72.
- [15] SENA K, BARTON C, HALL S. Influence of spoil type on afforestation success and natural vegetative recolonization on a surface coal mine in Appalachia, United States[J]. Restoration Ecology, 2015, 23(2): 131-138.
- [16] 胡振琪,位蓓蕾,林杉,等.露天矿上覆岩土层中表土替代材料的筛选[J].农业工程学报,2013,29(19):209-214.
HU Zhenqi, WEI Beilei, LIN Shan, et al. Selection of topsoil alternatives from overburden of surface coal mines[J].

- Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(19): 209–214.
- [17] 任利东, 黄明斌, 樊 军. 不同类型层状土壤持水能力的研究[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19):105–111.
REN Lidong, HUANG Mingbin, FAN Jun. Study on water retention capacity for drained soils with different textural layering [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(19):105–111
- [18] LEIJ F J, SCHAAP M G, ARYA L M. Indirect methods of soil analysis. Part 4. Physical methods [M]. SSSA Book Ser SSSA, Madison, WI, 2002.
- [19] 余红玲. 非饱和土土水特征曲线的预测研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
YU Hongling. Prediction for the soil–water characteristic curve of unsaturated soils [D]. Wuhan : Wuhan University of Technology, 2014.
- [20] LI D , GAO G , SHAO Ming'an, *et al.* Predicting available water of soil from particle–size distribution and bulk density in an oasis – desert transect in northwestern China[J]. Journal of Hydrology, 2016, 538:539–550.
- [21] ZHAO C, SHAO Ming'an, JIA X , *et al.* Using pedotransfer functions to estimate soil hydraulic conductivity in the Loess Plateau of China[J]. CATENA, 2016, 143:1–6.
- [22] ARYA L M, PARIS J F. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristics from particle–size distribution and bulk density data[J]. Soil Sci Soc Am J, 1981, 45:1023–1030.
- [23] ARYA L M, LEIJ F J, VAN Genuchten M Th, *et al.* Scaling parameter to predict the soil water characteristic from particle size distribution data[J]. Soil Sci Soc Am J, 1999, 63:510–519.
- [24] ARYA L M , RICHTER J C , PARIS J F . Estimating profile water storage from surface zone soil moisture measurements under bare field conditions[J]. Water Resources Research, 1983, 19(2):403–412.
- [25] ARYA L M , HEITMAN J L , THAPA B B , *et al.* Predicting saturated hydraulic conductivity of golf course sands from particle–size distribution[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74(1):33.
- [26] MOHAMMADI M H, VANCLOOSTER M. Predicting the Soil Moisture Characteristic Curve from Particle Size Distribution with a Simple Conceptual Model[J]. Vadose Zone Journal, 2011, 10(2):594.
- [27] MESKINIVISHKAEI F, MOHAMMADI M H, VANCLOOSTER M. Predicting the soil moisture retention curve, from soil particle size distribution and bulk density data using a packing density scaling factor[J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2014, 18(10):4053–4063.
- [28] Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedo–transfer functions.
- [29] OSTOVARI Y, ASGARI K, CORNELIS W. Performance evaluation of pedotransfer functions to predict field capacity and permanent wilting point using UNSODA and HYPRES Datasets [J]. Arid Soil Research & Rehabilitation, 2015, 29(4):383–398.
- [30] ASSOULINE S, Or D . Conceptual and parametric representation of soil hydraulic properties: a review [J]. Vadose Zone Journal, 2013, 12(4):55–59.