

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.03.005

李禹凝, 王金满, 张雅馥, 等. 干旱半干旱煤矿区土壤水分研究进展. 土壤, 2023, 55(3): 494–502.

## 干旱半干旱煤矿区土壤水分研究进展<sup>①</sup>

李禹凝<sup>1</sup>, 王金满<sup>1,2\*</sup>, 张雅馥<sup>1</sup>, 朱秋萍<sup>1</sup>, 王敬朋<sup>1</sup>

(1 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083; 2 自然资源部土地整治重点实验室, 北京 100035)

**摘要:** 本文重点评述了干旱半干旱煤矿区土壤水分与生态环境效应研究进展, 系统总结了土壤水分运移机理与动态模拟方法。采煤塌陷会破坏土壤含水层构造并导致地下水位下降, 间接改变土壤含水率空间分布特征; 露天采矿与复垦过程中机械压实导致土壤孔隙数量减少, 连通性减弱, 土壤水分入渗受阻; 土壤重构与植被重建技术能够有效改善土壤结构, 缓解土壤水分流失。在未来研究中, 首先应进一步丰富势能理论体系, 完善数值模拟技术并引入动态指标; 其次应结合干旱半干旱煤矿区环境的特殊性, 加强土壤水分运移规律及其机理研究; 最后应基于土壤-植被-水分间耦合关系优化调控措施, 促进干旱半干旱煤矿区复垦与生态修复。

**关键词:** 土地生态; 土壤水; 非饱和带; 土壤水分运移; 煤矿区

**中图分类号:** S152      **文献标志码:** A

### Soil Water in Arid and Semi-arid Mining Areas: A Review

LI Yuning<sup>1</sup>, WANG Jinman<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Yafu<sup>1</sup>, ZHU Qiuping<sup>1</sup>, WANG Jingpeng<sup>1</sup>

(1 School of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2 Key Laboratory of Land Consolidation and Rehabilitation, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China)

**Abstract:** In this paper, the research progresses on soil moisture and ecological environment effects in the arid and semi-arid coal mining areas are reviewed, and soil moisture transport mechanism and dynamic simulation methods are systematically summarized. The results show that coal mining collapse destroys soil aquifer structure and deepens the groundwater level, indirectly changing the spatial distribution of soil water content; mechanical compaction during surface mining and reclamation reduces the number and connectivity of soil pores, which prevents soil water infiltration; and soil reconstruction and revegetation techniques can effectively improve soil structure and alleviate soil water loss. It is suggested that future research should be strengthened on the following aspects: Firstly, the potential energy theory system should be further enhanced, and dynamic indicators should be added to numerical simulation methodologies; Secondly, given the special characteristics of the arid and semi-arid coal mining environment, soil moisture migration law and its underlying mechanism should be reinforced; Thirdly, the control measures should be optimized based on the coupling relationship between soil-vegetation-moisture to promote reclamation and ecological restoration in arid and semi-arid coal mining areas.

**Key words:** Land ecology; Soil water; Vadose zone; Soil moisture migration; Mining area

土壤水是指地表与潜水位垂直剖面间土壤层中的水分, 亦被称为非饱和带土壤水<sup>[1]</sup>。非饱和带土壤孔隙同时被水分与气体占据, 是岩土颗粒、水分、气体三相物质共同存在的一个复杂系统, 非饱和带土壤水运移也被认为是水文循环中最重要且最复杂的环节<sup>[2]</sup>。土壤水是连接大气水、地表水、地下水与植被间的关键纽带<sup>[3]</sup>, 是水分与溶质吸收、维持和运输的重要载体, 促进了地球地表系统水文循环与能

量交换<sup>[4-5]</sup>。当前, 在自然变化和人类活动共同作用下, 对土壤的利用与扰动不断加剧, 不同时空尺度中土壤水分运移与循环的变化也更加剧烈, 因此开展土壤水分运移研究十分必要。

中国是当前世界上最大的煤炭生产国和消费国之一<sup>[6]</sup>, 煤炭占中国一次能源消费比重一半以上, 且未来一段时间内中国仍将保持以煤炭为主的能源结构<sup>[7]</sup>。在中国, 煤矿多分布在黄土高原与内蒙古高原

①基金项目: 内蒙古典型矿区生态修复技术集成与示范项目(2020ZD0020)资助。

\* 通讯作者(wangjinman@cugb.edu.cn)

作者简介: 李禹凝(1999—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 硕士研究生, 主要研究方向为土地整治与生态修复。E-mail: lynncugb@163.com

等干旱半干旱地区，区域内生境脆弱，水土流失等问题严重。土壤水是干旱半干旱区植被生长的主导因素<sup>[8-9]</sup>，然而由于采矿活动剧烈，矿区及周边土壤逐渐退化，植被受损日益严重<sup>[10-13]</sup>。其中，井工矿开采会导致采空区地面塌陷、裂缝等问题，采矿区隔水层断裂，地下水下降，进而影响土壤水分的分布特征；露天矿开采与排土场复垦过程中土地压占问题严重，重型机械的运输与碾压增强了土壤压实程度，破坏了土壤孔隙结构，改变了土壤水分运移路径。由此可见，矿区活动打破了区域水循环平衡，加剧了土壤与植被退化<sup>[13-14]</sup>，矿区生态环境问题亟待解决。

因此，开展煤矿区土壤水分变化与驱动机制研究对矿区植被修复与水资源调控具有重要意义。当前土壤水分研究方向主要集中在农业活动下土壤水盐运移方面，对采矿活动与复垦措施下水分运移规律与机理研究的关注较少，起步较晚。对此，本文系统整理并评述了不同活动下煤矿区土壤结构与水分变异特征、土壤水分运移形式与能量转化关系、土壤水分观测与模拟方法，并指出了未来有待进行的科学研究工作，以期促进有关领域科学研究的深入开展。

## 1 煤矿区采煤活动对土壤水分的影响

### 1.1 采煤塌陷对土壤水分的影响

采煤活动中大规模机械开采会破坏上层含水层构造，矿层顶部平衡条件被破坏而失去支撑，造成地表发生裂缝与沉陷<sup>[15]</sup>，引发包气带宏观结构发生显著变化。根据塌陷区稳定程度可将包气带宏观结构变化划分为3个阶段：采煤塌陷前阶段，包气带层序相对清晰，土壤颗粒排列有序、均一；采煤塌陷非稳定阶段，大量裂隙贯穿地表，岩土孔隙性发生变化；塌陷稳定阶段，土壤层序与容重逐渐趋于塌陷前状态，但包气带内仍存在隐伏裂隙，包气带厚度持续增加<sup>[16]</sup>。此外，由于外界扰动，裂隙塌陷区土壤内部微观构造也发生改变，土壤中细黏粒含量减少，中粗粉粒增加，土壤粒径均一性变差<sup>[17-20]</sup>。部分学者对我国西北干旱半干旱地区采煤沉陷区土壤的理化性质进行观测与时间序列分析，普遍发现煤矿风沙区土壤逐渐粗化<sup>[21-22]</sup>，且随着塌陷年限的增加，土壤毛管孔隙度减小，非毛管孔隙度增加，田间持水量逐渐降低<sup>[23]</sup>。可见，采煤塌陷引起的包气带结构变异研究是探究采煤塌陷对非饱和带土壤水运移影响机理的关键。

采煤沉陷的发生是一个相对缓慢持续的过程，随着地表裂缝发育与塌陷年限延长，土壤水空间分布特

征发生显著变化，其中在垂直方向上，表层(0~20 cm)土壤含水率变异作用显著，土壤水分流失量随着剖面深度的增大而减小<sup>[21]</sup>，土壤含水量低值区位于塌陷坑部位<sup>[24]</sup>。在此基础上，郭巧玲等<sup>[25]</sup>对裂缝区与对照组垂向土壤含水量进行统计分析，发现裂缝越宽，深层含水率变异越明显。在水平方向上，土壤含水率整体呈现由裂缝区向非裂缝区递增趋势，各深度土壤含水量低值区均位于裂缝区的裂缝发育带，高值区位于非裂缝区的植被覆盖区<sup>[26-27]</sup>。在采煤塌陷区土壤水分运移规律研究中发现，土壤水分蒸发与入渗过程变化显著，沉陷明显增加了土壤水分垂直入渗深度与蒸发量，降低了表层土壤持水能力<sup>[17]</sup>。

目前，研究人员已经针对采煤塌陷对土壤水分的影响进行了多项研究，但当前研究指标种类较为单一，主要为土壤含水率、入渗率与蒸发量，并且研究分析多为对上述指标的静态描述，缺少对其他水分运移形式的动态探究与机理揭示。

### 1.2 土壤压实对土壤水分的影响

土壤内固、液、气三相共存，土粒或团聚体间的孔隙结构会直接影响水分运移路径与方式<sup>[28]</sup>，其中大孔隙(孔隙直径>100 μm)和中孔隙(30~100 μm)作用效果更为显著<sup>[29]</sup>。大量研究表明，矿区内重型机械运输与排土场压占等活动会大大增强土壤压实程度，大、中孔隙的孔隙直径、数量与孔隙度均减少，土壤内水分流通与气体扩散严重受阻<sup>[30]</sup>。从空间角度看，不同土层间的孔隙特性也表现出较大的差异，随着深度的增加，土壤孔隙的数量、孔隙度、孔隙直径和圆度均减小<sup>[31]</sup>，总孔隙度也呈降低趋势<sup>[32]</sup>。此外，矿区土壤压实还会破坏包气带内孔隙的连通性。王金满等<sup>[33]</sup>通过CT扫描技术证明，黄土区露天煤矿排土场土壤孔隙之间的连通性会随着压实程度增加而降低；对土壤水分特征曲线的预测发现，土壤含水量也随着压实程度增加而迅速降低。

采矿活动中大型机械碾压严重破坏了土壤理化性质，改变了水气运移方式，打破了原区域水文平衡。一方面，表层土壤压实增加了土壤容重，阻碍了降水入渗与植被根系生长。在半干旱矿区，降雨量较小时，雨水难以入渗到深层土壤(20 cm以下)<sup>[34]</sup>。吕春娟等<sup>[35]</sup>通过试验测算发现在压实作用下，土壤水分入渗特征随容重的增大呈幂函数趋势减小，进一步验证了上述结论。另一方面，排土场土壤压实还会加速地表集中径流的形成，造成土壤侵蚀和水土流失等危害。魏忠义等<sup>[36]</sup>通过调查安太堡露天煤矿排土场，发现其平台表层土壤严重压实，渗透系数仅为0.3~0.4 mm/min，

极易形成暴雨径流,而边坡易发生滑坡与水土流失。由于平台压实强度高而边坡堆积松散,黄土高原地区露天煤矿排土场的平台径流量大于边坡,水土流失量小于边坡,而在草灌乔混合植被组合修复下,土壤孔隙率与入渗率均得到提高,可有效缓解区域水土流失<sup>[37]</sup>。

综上,在矿区开采与复垦过程中,受机械压实作用影响,土壤容重增大,土体孔隙结构受损,影响了土壤水分渗透及溶质运输。当前研究主要探讨了矿区土壤压实对水分入渗与径流的影响,而我国煤矿多分布在西部干旱半干旱地区,水分蒸发是制约当地植被生长的关键。因此,针对干旱半干旱煤矿区,应当加强土壤压实对土面蒸发的影响规律研究,深入探讨矿区压实对土壤水分运移的动态作用机理。

## 2 煤矿区土地复垦对土壤水分的影响

### 2.1 土壤重构

土壤重构是矿区复垦与生态修复的关键基础与核心,主要通过工程措施或添加改良剂等方法,对矿区损毁土壤的理化性质进行修复与重构,实现土壤生产力的恢复与提高<sup>[38]</sup>。由于矿区复垦方向主要为农业用地,且土壤、水、植被三者间关系十分紧密,因此土壤重构下非饱和带土壤水分变化得到广泛关注<sup>[39]</sup>。对于高潜水位采煤塌陷区,单一粉煤灰充填会导致上层土壤含水率过高,植物根系腐烂<sup>[40-41]</sup>;单一煤矸石充填会抑制地下水上升,植物缺水萎蔫;而煤矸石-粉煤灰混合物充填则兼备保水性与透气性<sup>[42]</sup>。而在黄土半干旱地区,通过“堆状地面”土壤重构方法将表层覆土按一定排列方式疏松堆积,发生降水时,松散的土壤能够有效分散土壤入渗,缓解暴雨径流,加速植被恢复<sup>[36]</sup>。在晋陕蒙矿区,沙黄土和砒砂岩以 7:3 比例混掺能有效减少土壤蒸发量,在含水量较高的时期抑制效果更加显著<sup>[43]</sup>。可见,重构土壤能有效改善土壤孔隙结构,恢复土壤肥力,为植被恢复提供良好的承载与水源基础。许多学者也针对不同矿区土壤特征提出了相应的重构土壤剖面设计。研究表明,西部风沙区土壤重构时植被根系层衬垫 10~30 cm 的黄土,可以提升土壤含水率,有利于矿区植被恢复<sup>[44]</sup>。孙洁<sup>[45]</sup>基于野外调查与数值模拟发现,东蒙草原区露天矿排土场“腐殖土+黏土+中砂”的模式能有效提高土壤(0~50 cm)含水率,但不利于深层地下水接受降水入参与补给。由此看出,重构土壤对植被根系层的土壤持水能力有显著提升与恢复效果,但对深层土壤以及地下水影响机理尚不明晰。

目前矿区土壤重构与水分变化研究主要集中在复垦措施对土壤含水率的影响上,与采煤塌陷区土壤水分研究类似,其研究指标相对静态且单一。因此,未来应基于动态变量,如土壤导水率、土壤水势等,定量探究不同土壤剖面重构技术下土壤水分动态运移规律与时空变异特征,从表层土壤向深层地下水、从矿区场地尺度向区域流域尺度共同推进生态效应研究。

### 2.2 植被重建

采矿活动会导致地下水位下降,土壤含水率显著变化,且包气带结构严重变形,促使植被根系受损,矿区植被生长受阻<sup>[44]</sup>。郭巧玲等<sup>[25]</sup>对神府-东胜采煤塌陷区土壤含水量进行水平方向研究,发现各土层土壤含水量低值区均位于裂缝发育带,高值区位于非裂缝区的植被覆盖区,说明采煤裂缝破坏土体结构,影响土壤水空间分布,进而导致植被退化。随着研究的深入开展,部分学者基于植被重建角度提出了复垦研究与建议,以促进矿区水土保持与生态平衡。温明霞等<sup>[46]</sup>从不同土地利用类型角度研究发现,马家塔露天煤矿复垦区不同土层土壤水分入渗率与饱和导水率表现为:草地>林地>灌木地>荒地,且均与土壤容重呈负相关。不同复垦区植被组合对土壤水分的保持与运移作用效果亦不同。张燕乐等<sup>[47]</sup>调查晋陕蒙接壤区煤矿排土场发现,苜蓿(*Medicago sativa* L.)和沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)草灌混合模式更有利于缓解该地区土壤水分流失,土壤平均含水量同原地貌草地相比提高了 50% 以上。以安太堡露天矿为代表的黄土区煤矿排土场,刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)与油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)复垦组合下土壤水稳性团聚体的稳定性最好,复垦改良效果最佳<sup>[48]</sup>。虽然上述排土场均位于我国干旱半干旱地区,气候与生态背景具有一定的相似性,但基于地理环境的异质性,针对不同矿区不同土壤损毁问题应展开理论与实践研究,并提出相应的植被修复方案。

目前矿区植被修复下水分研究主要为短期内植被覆盖度与含水量的宏观变化,缺少对矿区植被与土壤水间微观作用机理分析,以及长期的原位动态监测。因此,未来应继续加强二者间耦合研究,并构建长期科学的监测反馈机制,以指导排土场土地合理利用和生态植被建设。

## 3 煤矿区土壤水分运移机理及研究方法

### 3.1 煤矿区土壤水分运移机理研究

1966 年 Philip 提出了土壤-植被-大气连续体(soil-

plant-atmosphere continuum, SPAC)概念<sup>[49]</sup>, 该理论概念描述了一个动态统一、相互反馈的连续系统, 随着 SPAC 的提出, 国际上土壤水分运移研究也逐渐从形态学观点向能态观点发展。20 世纪 80 年代初, SPAC 理论被引入中国, 许多学者基于此开展了地下水与土壤水间水分运移研究<sup>[50]</sup>。1999 年, 杨建锋等<sup>[51]</sup>进行了华北地区大气降雨-地表水-土壤水-地下水相互转化关系研究, 并提出地下水-土壤-植物-大气连续体(ground water-soil-plant-atmosphere continuum, GSPAC)的概念。GSPAC 系统中水分运移直接或间接地影响了大气降水、地下水补给、植被根系吸水等生态水文过程, 能量随水分运移过程发生传递与转换, 其中土壤水分运移方式主要包括入渗、蒸发和再分配。

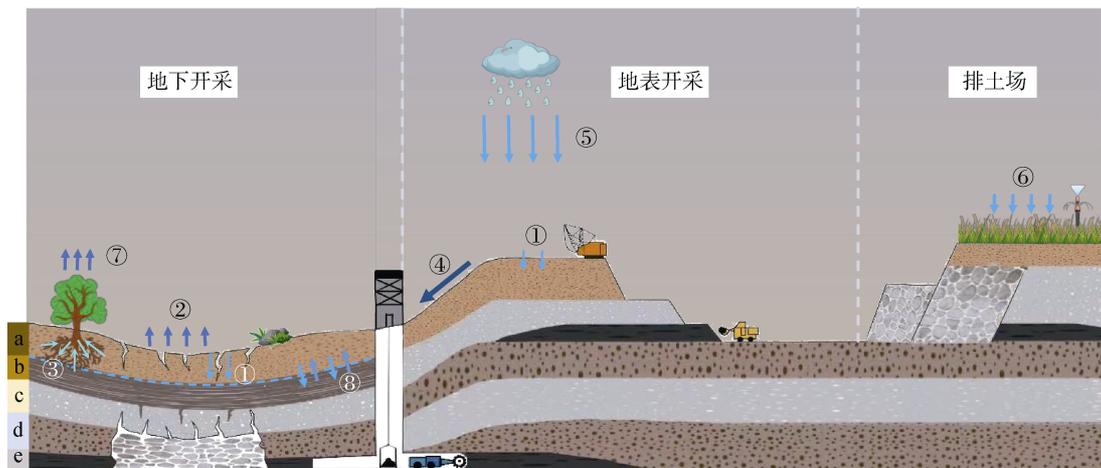
土壤入渗是土壤与大气界面水分运移的形式之一, 同时也是地面水转化为可被植被吸收利用水分的唯一途径<sup>[52]</sup>, 影响植被生长状况与土壤侵蚀程度。土壤入渗一般发生在降水与灌溉后, 垂向与水平方向上土壤入渗的主要驱动力分别为重力势和土壤基质势<sup>[53-54]</sup>。在干旱半干旱煤矿区, 不同形式与程度的人类活动导致土壤水分运移规律的差异性, 采煤塌陷区土壤水分空间变异性强, 主要由于塌陷区域土壤粗化严重, 持水性能差, 加速水分入渗<sup>[24]</sup>; 在排土场复垦过程中, 由于机械压实作用, 平台土壤容重增大, 大孔隙度降低, 水分入渗率减小, 加速地表径流的形成。土面蒸发是土壤与大气界面水分的另一种运移形式。采煤塌陷产生的裂缝与断面间接地增加了土壤蒸发面, 显著增加了水分蒸发量, 减小了表层土壤持水能力<sup>[17, 21]</sup>; 当包气带厚度大于极限蒸发深度时, 入渗补给量和包气带厚度无关, 仅会延长水分进入潜水面时间<sup>[55]</sup>。虽然部分学者对煤矿区土壤入渗与蒸发

特征进行了一定机理解释, 但缺少从能量本质出发对水分运移机理的定量化分析。水分再分配发生在土壤与植被根系交界处, 一般受土壤含水量、土壤质地以及植被导水性等因素影响。植物水势与土壤水势间差值是运移过程的主要驱动力, 根系可从深层较湿润土壤中吸取水分后通过侧根运输到表层较干燥的土壤中; 反之, 当发生降水等情况后, 根系从表层湿润土壤中吸收水分向下运输到深层较干燥土壤中, 从而改善表层土壤水分状况<sup>[56-58]</sup>。可见, 土壤水分同时以多种方式发生运移, 且涉及不同空间方向, 受到多种因素与驱动力共同影响, 很难通过观测试验直接探究, 应加强构建土壤水分运移模型, 以利于对不同采矿活动下土壤水分运移展开模拟研究。

目前土壤水分运移机理研究相对集中在农田与森林生态系统中, 而煤矿区土壤水分运移特征的机理研究相对匮乏, 且主要为定性描述, 缺少从定量角度揭示矿区土壤水分运移的能量驱动机制。基于以上研究, 本文提出矿区土壤水分运移示意图(图 1), 以期进一步完善矿区地下水与地表间相互作用关系, 推动矿区土壤水分运移与能量循环的动态研究。同时, 当前煤矿区土壤水分运动研究主要集中在大气-土壤-植被间, 在未来的研究中, 应结合煤矿区地下水位下降的实际背景, 聚焦于矿区土壤水与地下水之间的相互作用研究, 不断丰富完善矿区 GSPAC 系统中水分运移理论体系。

### 3.2 煤矿区土壤水分运移研究方法

**3.2.1 试验观测法** 为探究煤矿区土壤水分运移规律, 需结合相关仪器对水分变化情况进行观察与测算, 按照试验实施位置与观测对象, 可分为原位试验和室内物理试验(表 1)。原位试验一般在矿区及其周



(①入渗; ②蒸发; ③再分配; ④径流; ⑤降水; ⑥灌溉; ⑦蒸腾; ⑧地下水交换; a 非饱和带; b 饱和带; c 基岩层; d 直接顶; e 煤层)

图 1 煤矿区土壤水分运移示意图

Fig. 1 Diagram of soil moisture migration in mining area

表 1 土壤水分运移原位与室内观测的主要方法  
Table 1 Main methods of *in situ* and laboratory observations to soil moisture migration

方法类型	技术手段	适用条件	测定变量	对土壤是否扰动	参考文献
土壤水分法	烘干法	原位	土壤含水率( $\theta$ )	扰动	[60-61]
	时域反射仪(TDR)法	原位、室内	土壤含水率( $\theta$ )	扰动	[62-63]
	探地雷达法	原位	土壤含水率( $\theta$ )	非扰动	[64-65]
示踪法	负压计法	原位	土壤水势( $\psi$ )	扰动	[66-67]
	氘( $^2\text{H}$ )	原位、室内	$\delta^2\text{H}$	扰动	[68-69]
	氧( $^{18}\text{O}$ )	原位、室内	$\delta^{18}\text{O}$	扰动	[70-71]
	染色剂	原位、室内	染色面积	扰动	[72-73]

边自然环境下布设仪器, 直接对土壤、植被及气候等进行观测。但该方法试验成本高、精度有限, 且试验过程会对已经损毁的土壤带来二次扰动, 因此室内物理试验方法逐渐得到发展。通过在实验室中构建土体物理模型, 可以较好地模拟并观测自然或人为干扰下土壤水分运动情况。毕银丽等<sup>[59]</sup>通过在土体底部设置留空区实现地裂缝发生过程的模拟, 进而探究了裂缝区域内土壤的水盐运移规律。相较于原位观测, 土柱实验的操作可控性强, 能充分模拟并反映人为扰动下土壤水分动态变化, 且便于多次试验进行统计分析, 但该方法无法反映实际矿区宏观结构下的真实过程。因此, 两种试验方法互为补充, 能够更直观准确

地探究土壤水分运移规律。

**3.2.2 数值模拟法** 1931年 Richards 提出适用于研究非饱和土壤水分运动的 Richards 方程, 使得土壤水分研究从静止、定性角度逐渐转变为动态、定量的机理探究<sup>[74]</sup>, 丰富了土壤水动力学模型, 此后, 一些学者对其进行了改进以适用于干旱区与煤矿区非饱和带土壤水分的定量分析与预测研究(表 2)。李玲等<sup>[81]</sup>结合 Richards 方程和 van Genuchten-Mualem 模型计算多种气候区的土壤水力参数, 结果表明进气值倒数和饱和导水率是影响干旱半干旱区土壤水程相关性的主要参数。王强民等<sup>[82]</sup>结合 Richards 方程与 Feddes 模型模拟探究了生态脆弱矿区高强度植被

表 2 常用的土壤水动力学模型  
Table 2 Commonly used soil moisture migration models

运移过程	模型	公式
土壤入渗	Darcy 模型 <sup>[75]</sup>	$q = \frac{-kd(H_p - z)}{D_z}$
	Green-Ampt 模型 <sup>[76]</sup>	$f = k_s \left[ 1 + \frac{\theta_s - \theta_0}{I} \right]$
	Richards 模型 <sup>[74]</sup>	$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{K(\theta)}{C(\theta)} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \frac{\partial K(\theta)}{\partial z}$
土面蒸发	Philip 模型 <sup>[77]</sup>	$f_t = \frac{1}{2} S t^{-1/2} + k_s$
	Penman 模型 <sup>[78]</sup>	$E_0 = \frac{\Delta + \gamma}{\lambda} (R_n - G) + \frac{\gamma}{\gamma + \Delta} E_a$
	Penman-Monteith 模型 <sup>[79]</sup>	$\lambda E_0 = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a C_p \frac{(e_s - e_a)}{\gamma_a}}{\Delta + \gamma \left( 1 + \frac{\gamma_s}{\gamma_a} \right)}$
水分再分配	Shuttleworth-Wallace 模型 <sup>[77]</sup>	$\lambda E = \frac{1}{1 + \frac{\rho_s \rho_a}{\rho_c (\rho_s + \rho_a)}} \frac{\Delta R + \frac{\rho_c p D - \Delta r_s^a (R + R_s)}{r_a^a + r_a^s}}{\Delta + \gamma \left( 1 + \frac{r_s^s}{r_a^a + r_a^s} \right)}$
	Ryel 模型 <sup>[80]</sup>	$HR_i = C_{RT} \sum_j (\psi_j - \psi_i) - \min(c_i, c_j) \frac{R_i R_j}{1 - R_i} D_{tran}$
根系吸水	Feddes 模型 <sup>[77]</sup>	$S(x, z, h) = \alpha(x, z, h) \beta(x, z) T_p L$

恢复对地下水的影响机制。但由于煤矿区 SPAC 系统相对复杂且不稳定,土壤水动力学模型在应用过程中模拟与预测精度有待提高。

随着理论与技术发展,计算机模型逐渐用于土壤水分及溶质的运动机制研究与预测,这些模型既可以模拟土壤介质中水、热和溶质的运移情况,也可以分析植被根系吸水与溶质吸附等过程(表 3)<sup>[83-87]</sup>。如, Wang 等<sup>[88]</sup>基于土柱试验与 Hydrus-1D 模型对干旱

区露天煤矿重构土壤的水分分布特征与运移情况进行模拟;杨泽元等<sup>[89]</sup>利用 Hydrus-2D 构建了采煤裂缝对非饱和带土壤水运移影响的二维水热耦合非稳定流模型;李鑫<sup>[90]</sup>设计多种微地形布设方案并结合 Hydrus-3D 实现了三维动态建模,探究了排土场不同微地形构造下的水流入渗过程及其水文效应影响机理。由此可见,煤矿区土壤水分运移模拟研究逐渐由一维特征分析向三维机理研究与可视化发展。

表 3 常用非饱和多孔介质中水和溶质运移数值模型比较  
Table 3 Comparison of numerical models for water and solute transport in unsaturated porous media

模型	尺度	包含过程	优势	局限性
HYDRUS	点位	饱和和非饱和土壤水、溶质、热运移,根系吸水	可灵活处理各类水流边界	边界条件复杂,多为土柱模拟研究
SWAP	田间	SPAC 系统中水、溶质、热运移	可同时考虑饱和带和非饱和带,且考虑作物吸收	难以反映整个区域水盐动态
SWAT	流域	水文过程、土壤侵蚀、污染负荷	适用于流域尺度较大、流域数量较多的分布式水文模型	无法模拟基于物理的空间分布地下水流程和溶质运移
WAVES	流域	SPAC 系统中能量、水、碳、溶质运移	适用于研究土地利用及气候变化对水文过程的影响	假定水分仅以液相流动,无法实现优先流模拟

综上,数值模拟法能准确且便捷地通过多种指标参数描述土壤水分在不同时间与空间尺度下的动态运移过程,规避了干旱半干旱煤矿区环境脆弱与土体模型的条件制约。但由于矿区场地尺度的土壤性质存在时空异质性,对其进行数值模拟过程中边界条件复杂,所需土壤水动力学参数较多,求解较为困难。

**3.2.3 非线性预测法** 非饱和带土壤是一个多相物质共存的复杂系统,仅通过单一的线性回归函数无法准确地反映不同时空下土壤水分与各要素间的作用关系<sup>[91]</sup>。目前土壤水分非线性预测模型主要有支持向量机(support vector machine, SVM)和 BP 神经网络(back propagation neural network)两种建模方法。

支持向量机法适宜于解决高度非线性问题,因其具有算法简单、计算量小、易于实现等优势,被广泛应用于多个研究领域中<sup>[92-93]</sup>。李彬楠和樊贵盛<sup>[94]</sup>基于 SVM 法构建了土壤水分特征曲线 Van-Genuchten 模型的参数  $\alpha$ 、 $n$  预测模型,预测精度较高。姜雪等<sup>[95]</sup>利用 SVM 法对羊草沟煤矿区土壤重金属含量进行了预测,其结果与野外调查情况和模糊综合评判法结果均高度相似。可见, SVM 模型能满足区域与场地尺度研究的需求与精度,可将其进一步应用于煤矿区土壤理化性质与水分特征分析与预测研究中。BP 神经网络模型具有较强的自学习、自适应和处理非线性问题能力,应用较为广泛<sup>[96]</sup>。李彬楠和樊贵盛<sup>[97]</sup>通过构建土壤理化性质与 Van-Genuchten 模型参数非线性

预测模型,发现灰色 BP 神经网络模型预测精度高,但存在过度拟合的情况。王广军等<sup>[98]</sup>利用决策树与 BP 神经网络法,从遥感影像中提取了霍林河露天煤矿区草地荒漠化特征信息。SVM 与 BP 神经网络法均能实现对土壤水分的有效预测,且输入因素主要为气象要素与土壤基本理化性质,数据获取简便,预测精度较高。但 SVM 模型形式相对简单,适宜于解决小样本问题;BP 模型精度更高,但模型形式复杂,易陷入过度拟合,适宜于获取高精度土壤水分特征曲线。

当前国内研究数据样本主要集中在农灌区,而煤矿区土壤水系统作为一个高度复杂的非线性系统,影响因素多样且影响机理复杂,因此未来应扩大样本的地理空间范围与土地利用类型,在干旱半干旱煤矿区土壤水分研究中引入非线性预测模型进行数学建模,实现矿区损毁与重构土壤水分的长时序、高精度预测。

## 4 结论与展望

非饱和带土壤水是干旱半干旱矿区生产与复垦时需要考虑的关键因素。国内外学者针对农田土壤水分研究相对成熟,但针对采煤生态脆弱区土壤水分运移研究起步较晚,仍存在以下 3 个方面有待进一步深入研究。

### 4.1 创新煤矿区土壤水分无损模拟预测

目前煤矿区土壤水分研究主要基于土壤含水率这一静态指标展开分析,而干旱半干旱地区本底环境

脆弱,采煤扰动使得矿区土壤结构破坏严重,水分运移变化剧烈。因此,今后在矿区原位调查中应当创新发展无损探测技术,丰富动态指标参数,加强对土壤水分运移的动态分析。结合多种准确指标参数能有效提高土壤水分模型的模拟精度,定量分析煤矿区土壤水分运移规律,并有效预测不同情境下土壤水分动态变化情况,有利于在矿区生态修复实践指导过程中实现可视化发展。

#### 4.2 加强煤矿区土壤水分运移驱动分析

目前非饱和带土壤水分运移理论研究相对集中在农田与森林生态系统中,而煤矿区土壤水分运移研究内容主要为土壤-大气界面间的水分入渗、蒸发与径流特征分析,对于土壤水的动态规律与驱动机理探索较少。此外,地下水是影响干旱半干旱区植被生长的关键因素之一,而矿区地下水位受开采影响普遍逐年下降。因此,应加强土壤水与地下水、植被间作用与转化关系的研究,进一步探究包气带中水分运移的驱动因素及各驱动力间的耦合关系,不断丰富完善煤矿区 GSPAC 系统水分运移理论体系,以利于促进矿区植被复垦工作的科学开展。

#### 4.3 完善煤矿区土壤水分调控机理研究

采煤活动带来的压实、塌陷等问题会加剧干旱半干旱地区水土流失,威胁植被生长。土壤水分运移规律与驱动机制的理论研究旨在指导矿区复垦与生态修复实践。因此,针对干旱半干旱煤矿区,在明确采矿与复垦前后土壤水分运移规律及驱动机制的基础上,应探索不同条件下矿区复垦新措施的改良效果,确定最优重构土壤剖面与复垦植被配置,实现因地制宜、因矿施策,建立长期稳定的土壤-植被-水分监测系统,为后续矿区水资源调控与生态修复提供理论研究数据与实践指导依据。

#### 参考文献:

- [1] 雷志栋, 胡和平, 杨诗秀. 土壤水研究进展与评述[J]. 水科学进展, 1999, 10(3): 311-318.
- [2] Štekauerová V, Nagy V, Kotorová D. Soil water regime of agricultural field and forest ecosystems[J]. Biologia, 2006, 61(19): S300-S304.
- [3] 赵文智, 周宏, 刘鹤. 干旱区包气带土壤水分运移及其对地下水补给研究进展[J]. 地球科学进展, 2017, 32(9): 908-918.
- [4] Pfletschinger H, Prömmel K, Schüth C, et al. Sensitivity of vadose zone water fluxes to climate shifts in arid settings[J]. Vadose Zone Journal, 2014, 13(1): 1-14.
- [5] Moradi A, Smits K M, Lu N, et al. Heat transfer in unsaturated soil with application to borehole thermal energy storage[J]. Vadose Zone Journal, 2016, 15(10): 1-17.
- [6] 安英莉, 戴文婷, 卞正富, 等. 煤炭全生命周期阶段划分及其环境行为评价——以徐州地区为例[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(2): 293-300.
- [7] 那磊. 新一代信息技术赋能煤炭行业智慧化发展[J]. 煤炭工程, 2020, 52(8): 193-196.
- [8] 王强民, 赵明. 干旱半干旱区煤炭资源开采对水资源及植被生态影响综述[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(3): 77-81.
- [9] 刘凯, 高磊, 彭新华, 等. 半干旱区科尔沁沙地土壤水分时空特征研究[J]. 土壤, 2015, 47(4): 765-772.
- [10] 胡振琪, 陈超. 风沙区井工煤炭开采对土地生态的影响及修复[J]. 矿业科学学报, 2016, 1(2): 120-130.
- [11] 郭俊廷, 李全生. 浅埋高强度开采地表破坏特征: 以神东矿区为例[J]. 中国矿业, 2018, 27(4): 106-112.
- [12] 戴华阳, 罗景程, 郭俊廷, 等. 上湾矿高强度开采地表裂缝发育规律实测研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(10): 124-129.
- [13] 王双明, 杜华栋, 王生全. 神木北部采煤塌陷区土壤与植被损害过程及机理分析[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 17-26.
- [14] 乔冈, 徐友宁, 陈华清, 等. 宁东煤矿区地裂缝对植被生态环境的影响[J]. 地质通报, 2018, 37(12): 2176-2183.
- [15] 李晶, 刘喜韬, 胡振琪, 等. 高潜水位平原采煤沉陷区耕地损毁程度评价[J]. 农业工程学报, 2014, 30(10): 209-216.
- [16] 张发旺, 宋亚新, 赵红梅, 等. 神府—东胜矿区采煤塌陷对包气带结构的影响[J]. 现代地质, 2009, 23(1): 178-182.
- [17] 毕银丽, 邹慧, 彭超, 等. 采煤沉陷对沙地土壤水分运移的影响[J]. 煤炭学报, 2014, 39(S2): 490-496.
- [18] 王琦, 全占军, 韩煜, 等. 采煤塌陷对风沙区土壤性质的影响[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(6): 110-118.
- [19] 何金军, 魏江生, 贺晓, 等. 采煤塌陷对黄土丘陵区土壤物理特性的影响[J]. 煤炭科学技术, 2007, 35(12): 92-96.
- [20] 魏江生, 贺晓, 胡春元, 等. 干旱半干旱地区采煤塌陷对沙质土壤水分特性的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(5): 84-88.
- [21] 赵国平, 朱建军, 张继平, 等. 神府煤田采煤塌陷引起的生态问题探讨[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(9): 103-107.
- [22] 臧荫桐, 丁国栋, 高永, 等. 采煤沉陷对风沙区土壤非饱和和水分入渗的影响[J]. 水科学进展, 2012, 23(6): 757-767.
- [23] 栗丽, 王曰鑫, 王卫斌. 采煤塌陷对黄土丘陵区坡耕地土壤理化性质的影响[J]. 土壤通报, 2010, 41(5): 1237-1240.
- [24] 赵红梅, 张发旺, 宋亚新, 等. 大柳塔采煤塌陷区土壤含水量的空间变异特征分析[J]. 地球信息科学学报, 2010, 12(6): 753-760.
- [25] 郭巧玲, 马志华, 苏宁, 等. 神府-东胜采煤塌陷区裂缝对土壤含水量的影响[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(1): 109-116.
- [26] 邹慧, 毕银丽, 朱柳韦, 等. 采煤沉陷对沙地土壤水分分布的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(3): 496-501.
- [27] 张延旭, 毕银丽, 陈书琳, 等. 半干旱风沙区采煤后裂缝发育对土壤水分的影响[J]. 环境科学与技术, 2015,

- 38(3): 11–14.
- [28] Poesen J, Ingelmo-Sanchez F. Runoff and sediment yield from topsoils with different porosity as affected by rock fragment cover and position[J]. CATENA, 1992, 19(5): 451–474.
- [29] 周虎, 李保国, 吕贻忠, 等. 不同耕作措施下土壤孔隙的多重分形特征[J]. 土壤学报, 2010, 47(6): 1094–1100.
- [30] 程亚南, 刘建立, 张佳宝. 土壤孔隙结构定量化研究进展[J]. 土壤通报, 2012, 43(4): 988–994.
- [31] Min X Y, Jiao H, Li X J. Characterizing effects of mechanical compaction on macropores of reclaimed soil using computed tomography scanning[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2020: 1–12.
- [32] Wang J M, Guo L L, Bai Z K. Variations in pore distribution of reconstructed soils induced by opencast mining and land rehabilitation based on computed tomography images[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2017, 63(12): 1685–1696.
- [33] 王金满, 张丽娜, 冯宇, 等. 基于 CT 扫描技术预测露天煤矿区不同压实土壤水分特征曲线[J]. 煤炭学报, 2022, 47(3): 1296–1305.
- [34] 杨国敏, 王力. 黑岱沟矿区排土场土壤水的氢氧稳定性同位素特征及入渗规律[J]. 煤炭学报, 2015, 40(4): 944–950.
- [35] 吕春娟, 王煜, 毕如田, 等. 不同压实水平下铁尾矿砂和土壤的水力学特征比较[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 108–115, 120.
- [36] 魏忠义, 胡振琪, 白中科. 露天煤矿排土场平台“堆状地面”土壤重构方法[J]. 煤炭学报, 2001, 26(1): 18–21.
- [37] Zhang L, Wang J M, Bai Z K, et al. Effects of vegetation on runoff and soil erosion on reclaimed land in an opencast coal-mine dump in a loess area[J]. CATENA, 2015, 128: 44–53.
- [38] 白中科, 周伟, 王金满, 等. 再论矿区生态系统恢复重建[J]. 中国土地科学, 2018, 32(11): 1–9.
- [39] Feng Y, Wang J M, Bai Z K, et al. Effects of surface coal mining and land reclamation on soil properties: A review[J]. Earth-Science Reviews, 2019, 191: 12–25.
- [40] 李新风. 高潜水位采煤塌陷区不同土壤重构模式水分运移规律与模拟研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- [41] 胡振琪. 煤矿山复垦土壤剖面重构的基本原理与方法[J]. 煤炭学报, 1997, 22(6): 617–622.
- [42] 宋杨睿, 王金满, 李新风, 等. 高潜水位采煤塌陷区重构土壤水分运移规律模拟研究[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 143–148, 154.
- [43] 任志胜, 解倩, 王彤彤, 等. 晋陕蒙露天煤矿排土场不同新构土体土壤蒸发特征研究[J]. 土壤, 2016, 48(4): 824–830.
- [44] 王强民, 董书宁, 王皓, 等. 西部风沙区采煤塌陷地裂缝影响下的土壤水分运移规律及调控方法[J]. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1532–1540.
- [45] 孙洁. 露天矿区采煤水位下降和土壤重构对地下水补给的影响[J]. 煤矿安全, 2021, 52(5): 59–65.
- [46] 温明霞, 邵明安, 周蓓蓓. 马家塔露天煤矿复垦区不同土地利用类型的土壤水分入渗过程研究[J]. 水土保持研究, 2009, 16(4): 170–173, 179.
- [47] 张燕乐, 甄庆, 张兴昌, 等. 露天煤矿排土场不同植被土壤水分特征及其时间稳定性[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 212–218.
- [48] 王杨扬, 赵中秋, 原野, 等. 黄土区露天煤矿不同复垦模式对土壤水稳性团聚体稳定性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(5): 966–973.
- [49] Philip J R. Plant water relations: some physical aspects[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1966, 17(1): 245–268.
- [50] 宫兆宁, 宫辉力, 邓伟, 等. 浅埋条件下地下水–土壤–植物–大气连续体中水分运移研究综述[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(S1): 365–373.
- [51] 杨建锋, 李宝庆, 李运生, 等. 浅地下水埋深区潜水对 SPAC 系统作用初步研究[J]. 水利学报, 1999, 30(7): 27–32.
- [52] 何丹, 马东豪, 张锡洲, 等. 土壤入渗特性的空间变异规律及其变异源[J]. 水科学进展, 2013, 24(3): 340–348.
- [53] 邓建才, 卢信, 陈效民, 等. 封丘地区土壤水分扩散率的研究[J]. 土壤通报, 2005, 36(3): 317–320.
- [54] 周宏. 干旱区包气带土壤水分运移能量关系及驱动力研究评述[J]. 生态学报, 2019, 39(18): 6586–6597.
- [55] Du C Y, Yu J J, Wang P, et al. Analysing the mechanisms of soil water and vapour transport in the desert vadose zone of the extremely arid region of northern China[J]. Journal of Hydrology, 2018, 558: 592–606.
- [56] 李鹏菊, 刘文杰, 王平元, 等. 植物根部水分再分配研究的区域特征及生态意义[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2007, 29(S1): 267–275, 291.
- [57] 管秀娟, 赵世伟. 植物根水倒流的证据及意义[J]. 西北植物学报, 1999, 19(4): 746–754.
- [58] 刘美珍, 孙建新, 蒋高明, 等. 植物-土壤系统中水分再分配作用研究进展[J]. 生态学报, 2006, 26(5): 1550–1557.
- [59] 毕银丽, 伍越, 张健, 等. 采用 HYDRUS 模拟采煤沉陷地裂缝区土壤水盐运移规律[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 360–367.
- [60] 周田田, 韩冬梅, 马英, 等. 干旱区轻度盐碱化滴灌棉田包气带水分运移规律研究[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(12): 157–163.
- [61] 强大宏, 艾宁, 刘长海, 等. 煤矿复垦区沙棘人工林土壤水分时空分布特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(9): 82–87.
- [62] 吴月茹, 王维真, 王海兵, 等. 黄河上游盐渍化农田土壤水盐动态变化规律研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(3): 80–84.
- [63] 马迎宾, 黄雅茹, 王淮亮, 等. 采煤塌陷裂缝对降雨后坡面土壤水分的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(3): 497–504.
- [64] 崔凡, 吴志远, 武彦斌. 探地雷达在西部煤矿砂壤地层含水率时空变化中的应用[J]. 煤炭学报, 2015, 40(10): 2437–2444.
- [65] Koyama C N, Liu H, Takahashi K, et al. In-situ measurement of soil permittivity at various depths for the calibration and validation of low-frequency SAR soil moisture models by using GPR[J]. Remote Sensing, 2017, 9(6): 580.

- [66] 韩冬梅, 周田田, 马英, 等. 干旱区重度和轻度盐碱地包气带水分运移规律[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 152–159.
- [67] 杨丽虎, 徐迎春, 马玉学, 等. 引黄灌区包气带土壤水分运移及对地下水的补给[J]. 水土保持研究, 2021, 28(6): 168–174.
- [68] 陈定帅, 高磊, 彭新华, 等. 干旱半干旱区土壤水稳定性氢氧同位素混合模型研究[J]. 土壤, 2018, 50(1): 190–194.
- [69] Mattei A, Goblet P, Barbecot F, et al. Can soil hydraulic parameters be estimated from the stable isotope composition of pore water from a single soil profile?[J]. *Water*, 2020, 12(2): 393.
- [70] 赵志鹏, 杨丽虎, 公亮, 等. 永宁引黄灌区土壤水分运移的同位素特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(10): 42–49.
- [71] Pu H M, Song W F, Wu J K. Using soil water stable isotopes to investigate soil water movement in a water conservation forest in Hani Terrace[J]. *Water*, 2020, 12(12): 3520.
- [72] Wang K, Zhang R D. Heterogeneous soil water flow and macropores described with combined tracers of dye and iodine[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 397(1/2): 105–117.
- [73] 杨永刚, 苏帅, 焦文涛. 煤矿复垦区土壤水动力学特性对下渗过程的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(16): 5876–5882.
- [74] Richards L A. Capillary conduction of liquids through porous mediums[J]. *Physics*, 1931(1): 318–333.
- [75] [75] 陈洪松, 邵明安. 黄土区坡地土壤水分运动与转化机理研究进展[J]. 水科学进展, 2003, 14(4): 413–420.
- [76] 韩用德, 罗毅, 于强, 等. 非均匀土壤剖面的 Green-Ampt 模型[J]. 中国生态农业学报, 2001, 9(1): 31–33.
- [77] 吴姗, 莫非, 周宏, 等. 土壤水动力学模型在 SPAC 系统中应用研究进展[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(1): 100–109.
- [78] Allen R G. A penman for all seasons[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1986, 112(4): 348–368.
- [79] 夏琼, 王旭, 窦顺, 等. 土体水分潜在蒸发确定方法研究进展[J]. 干旱区地理, 2018, 41(4): 793–801.
- [80] 鱼腾飞, 冯起, 司建华, 等. 植物根系水力再分配测定与模拟方法研究进展与展望[J]. 生态学杂志, 2015, 34(10): 2930–2936.
- [81] 李玲, 武冬冬, 王铁军, 等. 基于数值模拟的土壤水力参数对土壤水长程相关性的影响分析[J]. 水土保持学报, 2022, 36(1): 80–85, 94.
- [82] 王强民, 董书宁, 王文科, 等. 生态脆弱矿区高强度植被恢复对地下水补给的影响[J]. 煤炭学报, 2020, 45(9): 3245–3252.
- [83] 杨建锋, 万书勤, 邓伟, 等. 地下水浅埋条件下包气带水和溶质运移数值模拟研究述评[J]. 农业工程学报, 2005, 21(6): 158–165.
- [84] 杜学军, 闫彬伟, 许可, 等. 盐碱地水盐运移理论及模型研究进展[J]. 土壤通报, 2021, 52(3): 713–721.
- [85] 冯绍元, 马英, 霍再林, 等. 非充分灌溉条件下农田水分转化 SWAP 模拟[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 60–68.
- [86] 杨永辉, 渡边正孝, 王智平, 等. 气候变化对太行山土壤水分及植被的影响[J]. 地理学报, 2004, 59(1): 56–63.
- [87] 高震国, 钟瑞林, 杨帅, 等. Hydrus 模型在中国的最新研究与应用进展[J]. 土壤, 2022, 54(2): 219–231.
- [88] Wang X, Zhao Y L, Liu H F, et al. Evaluating the water holding capacity of multilayer soil profiles using hydrus-1D and multi-criteria decision analysis[J]. *Water*, 2020, 12(3): 773.
- [89] 杨泽元, 范立民, 许登科, 等. 陕北风沙滩地区采煤塌陷裂缝对包气带水分运移的影响: 模型建立[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 155–161.
- [90] 李鑫. 露天煤矿排土场微地形塑造下的土壤水文效应模拟研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
- [91] 李柳阳, 朱青, 刘亚, 等. 基于气象因子的长三角地区农田站点土壤水分时间序列预测[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 131–137.
- [92] 薛晓萍, 王新, 张丽娟, 等. 基于支持向量机方法建立土壤湿度预测模型的探讨[J]. 土壤通报, 2007, 38(3): 427–433.
- [93] Hassan-Esfahani L, Torres-Rua A, Jensen A, et al. Assessment of surface soil moisture using high-resolution multi-spectral imagery and artificial neural networks[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(3): 2627–2646.
- [94] 李彬楠, 樊贵盛. 基于支持向量机方法的土壤水分特征曲线预测模型[J]. 节水灌溉, 2019(1): 108–111, 117.
- [95] 姜雪, 卢文喜, 杨青春, 等. 应用支持向量机评价土壤环境质量[J]. 中国环境科学, 2014, 34(5): 1229–1235.
- [96] 李鑫星, 梁步稳, 白雪冰, 等. 光谱技术在土壤水分含量检测中的研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(12): 3705–3710.
- [97] 李彬楠, 樊贵盛. 土壤水分特征曲线 Van-Genuchten 模型参数的土壤传输函数比选[J]. 中国农村水利水电, 2018(5): 33–36.
- [98] 王广军, 胡振琪, 杜海清, 等. 采矿扰动下草地荒漠化的遥感分析——以霍林河露天煤矿区为例[J]. 遥感学报, 2006, 10(6): 917–925.