



移动扫码阅读

王成文,李英,徐兆祥,等.人工回灌下条件下的土壤水分响应特征分析[J].能源环境保护,2022,36(2):82-89.

WANG Chengwen, LI Ying, XU Zhaoxiang, et al. Analysis of soil moisture response characteristics under artificial recharge[J]. Energy Environmental Protection, 2022, 36(2): 82-89.

# 人工回灌下条件下的土壤水分响应特征分析

王成文<sup>1</sup>, 李英<sup>2,3</sup>, 徐兆祥<sup>1</sup>, 李洪波<sup>1</sup>

(1.宁夏回族自治区水文环境地质勘察院,宁夏银川 750011;2.中国地质大学(北京)水资源与环境学院,北京 100083;3.宁夏回族自治区地质局,宁夏银川 750021)

**摘要:**为确定人工回灌影响下的包气带土壤水分响应变化程度,阐明土壤水分运动特征,以原位水田为研究对象,利用长期监测数据分析了土壤含水率、负压、电导率等变量和灌溉入渗时间以及沿剖面埋深的关系,选择V-G模型拟合了土壤水分特征曲线,运用SPSS分析了土壤水分与负压的数理关系。结果表明:土壤水分和负压变化规律明显,土壤含水率与负压的相关性较好,相关系数均在88%以上;土壤水分特征曲线在单层埋深中较难拟合,通过多层埋深叠加可以得到较好的拟合曲线;土壤负压随含水率变化存在瞬间突变,需进一步提高监测频率。

**关键词:**灌溉补给;含水率;原位试验;相关性分析

中图分类号:X53;TU42

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2022)02-0082-08

## Analysis of soil moisture response characteristics under artificial recharge

WANG Chengwen<sup>1</sup>, LI Ying<sup>2,3</sup>, XU Zhaoxiang<sup>1</sup>, LI Hongbo<sup>1</sup>

(1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750011, China; 2. School of Water Resources &amp; Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Geological Bureau of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** In order to determine the change degree of soil moisture response in vadose zone under the influence of the artificial recharge and clarify the characteristics of soil moisture movement, in-situ paddy field was taken as the research object, the relationships between soil moisture content, negative pressure, electrical conductivity and irrigation infiltration time, and buried depth along the profile were analyzed based on long-term monitoring data. The V-G model was used to fit the soil moisture characteristic curve, and the mathematical relationship between soil moisture and negative pressure was analyzed by SPSS. The results show that the variation laws of soil moisture content and negative pressure are obvious. The correlation between soil moisture content and negative pressure is good, and the correlation coefficient is above 88%. It is difficult to fit the soil moisture characteristic curve in single-layer buried depth, but a better fitting curve can be obtained in superposition of multi-layer buried depth. There is a sudden change in soil negative pressure with the change of moisture content, so the monitoring frequency should be further improved.

**Key Words:** Irrigation supplies; Moisture content; In-situ soil test; Correlation analysis

## 0 引言

近年来,随着国内外越来越多的学者投入到

包气带水分的研究,发现包气带对联系地表水与地下水的水力关系有着极其重要的影响,特别是地表水作为地下水的主要补给源时。如 Shalev

收稿日期:2021-12-01;责任编辑:蒋雯婷

基金项目:宁夏自然科学基金(2021AAC03449,2021AAC03450);宁夏财政厅项目“沿黄生态经济带地下水资源开发利用与生态环境保护效应调查评价”(6400201901273)

第一作者简介:王成文(1991-),男,内蒙古乌兰察布人,工程师,硕士,主要从事环境与水文地质研究工作。E-mail:1120694441@qq.com

等<sup>[1]</sup>在美国西部干旱区建立包气带渗流试验场,并用非饱和达西定律来概化模拟地表水对地下水补给;汪可欣等<sup>[2]</sup>进行了大量农田灌溉试验,对旱区的水分运动规律进行了分析,并通过各种试验方法阐明了不同覆盖模式下的土壤水分运移特征和动态分析;韩占涛等<sup>[3]</sup>于宁夏清水河平原选择典型地区建立了包气带水分运移试验场,对旱田和灌田条件下的包气带水分运移进行了研究;商洁等<sup>[4]</sup>以野外监测数据为基础,结合数值模拟研究了巴丹吉林沙漠南部腹地包气带的水分运移规律。

目前,越来越多的学者意识到我国西北干旱地区的地下水主要受地表水回灌补给,如田间灌溉、引河回灌、河流、湖泊、湿地等地表水下渗补给地下水,而非降雨入渗补给<sup>[5-7]</sup>;对于引水灌区而言,特别西北干涸地区,降雨较少,蒸发较大,田间入渗灌溉是地下水补给的主要来源之一,故研究包气带水分入渗过程和入渗特征对整个区域的水循环有着积极的意义。本次研究以银川平原引黄灌区为研究对象,选择典型灌区建立原位回灌区试验场,选取对地下水补给作用和影响较大的水

稻为试验田,即选取一块封闭型水稻田(水田)为研究单元,研究该水稻田在人工回灌过程中的土壤水分响应和入渗过程,实时监测土壤的水分变化和地下水水位动态变化,分析在人工回灌条件下包气带土壤水分的动态响应特征。

## 1 试验方法与过程

### 1.1 试验土体物理性质

本次原位田间灌溉入渗试验选取典型田块进行面状入渗试验,选用持续灌溉补给的水稻田进行面状灌溉入渗试验研究。在原位试验场地选取的1个有代表性的剖面上进行包气带土壤水基本参数动态变化的数据监测,获取不同剖面空间和时间尺度上土壤含水率、土壤负压(基质势)、土中温度等参数,测定包气带土壤水分特征曲线。

在试验田内进行地层分层取样,在野外初步进行地层岩性的定性描述和分类,并在实验室进行颗分测试后定名。试验田埋深0~120 cm均以粉质黏土为主,在表层埋深20~30 cm有一层粉土,70~80 cm有一层粉砂,见表1的土壤物理特性和图1的颗粒级配曲线。

表1 试验田土的物理特性

Table 1 Physical characteristics of the test soil

编号	颗粒组成占比/%			土壤定名	容重/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	初始含水率/%
	细砂粒 (2~0.075 mm)	粉粒 (0.075~0.002 mm)	粘粒 (0~0.002 mm)			
1#	58.7	34.1	7.2	粉砂	1.45	15.81
2#	12.0	66.7	21.3	粉质黏土	1.38	18.55
3#	22.3	66.2	11.5	粉土	1.39	17.42

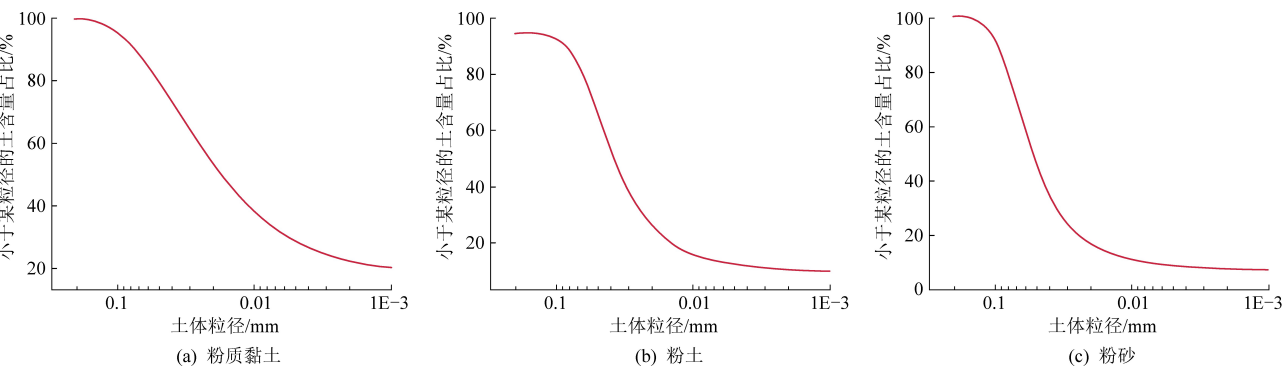


图1 试验用土颗粒级配曲线

Fig.1 The particle gradation curve of test soil

### 1.2 试验方案设计

水稻田试验场地面积约( $25 \times 25$ )  $m^2$ ,进行持续补水灌溉,实时记录每次引水的持续时间和引水量,控制试验期间的灌溉总量。同时,对试验田

间的地下水观测井进行长期动态水位监测,研究灌溉入渗补给对地下水的影响。在水稻田选取1处有代表性的剖面进行土壤水分、负压、温度的长期性监测工作。在试验田选取具有代表性的剖

面,进行开挖,开挖南北长约 2 m、东西宽 50 cm、深 120 cm 的横槽,然后在槽侧壁上用长 50 cm 的土钻向土壁内打深 20 cm 的水平孔,埋设土壤三参计(土壤三参数测定仪)、土壤负压计等监测仪

器,埋设方式为开槽侧壁横向埋设。在垂向剖面上,土壤含水率、基质势监测点位由浅到深设置埋深分别为 15、30、50、70、100 cm 的五组监测点位,仪器埋置示意图 2。

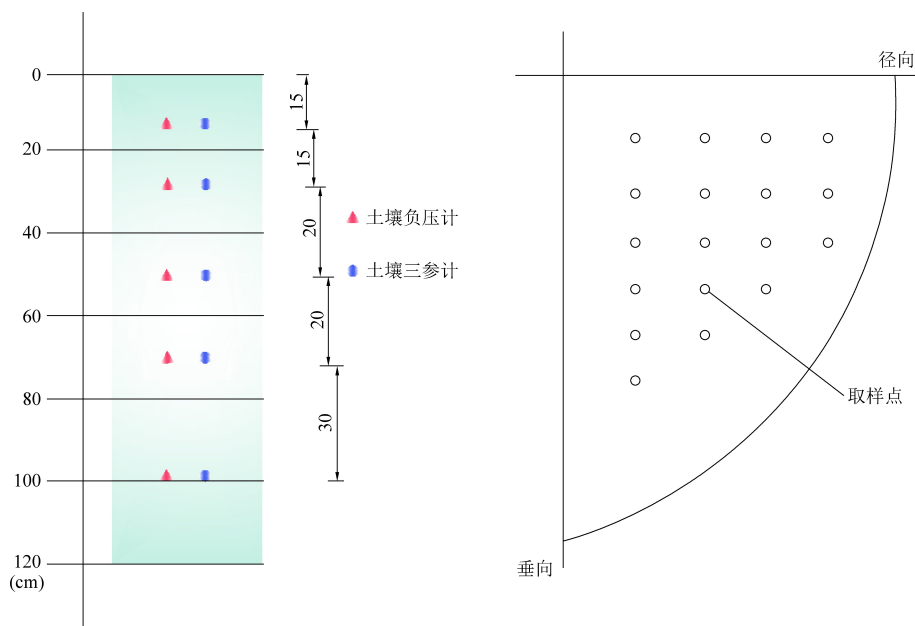


图 2 试验场地监测点埋深分布图

Fig.2 Depth distribution map of monitoring points in test site

### 1.3 试验设备与方法

本次试验主要分为田间试验监测和室内数据整理分析。

田间试验中主要监测设备有 Treos12 土壤三参仪、WM-1 型负压计测定土和地下水 Diver 监测仪,以及自制的数采设备 1 套。土壤三参仪主要是测试土壤水分、电导率和温度的变化,土壤负压计是测定土壤负压的变化;CTD-Diver 地下水自动监测仪,测定水位、温度和电导率,并存储于仪器内存中,可随时下载到计算机进行处理;数采设备是实时读取、记录和保存测试数据,设置记录间隔时间为 10 min/次。

在室内数据分析中,分类整理原始数据,主要运用 Origin Pro 2017 进行数据分析和制图,运用经典的 V-G 模型进行土壤水分特征拟合,并结合数理统计 SPSS18.0 软件进行相关性分析。

## 2 试验结果分析

### 2.1 各要素随时间的变化分析

本次田间原位灌溉入渗试验是研究大面积原位持续性、周期性的灌溉入渗试验,选取典型剖面进行包气带水分入渗监测试验,分析监测要素随时间变化的曲线。

结合图 3 可知,水稻田的土壤含水率(体积含水率)随着灌溉量的增加呈增长的趋势,埋深 15 cm 处初始含水率由 22.86% 增至试验中期的 31.12%,到末期随着灌溉结束回落至 29.85%,整个变化过程呈“骤增突变—平缓震荡”的变化过程,其他埋深处的土壤含水率也呈类似变化;同时,不同埋深处的土壤水分响应时间差异较大,在灌溉后的 8.8 h 浅层埋深 15 cm 处的水分开始增加,而中下层水分变化的响应时间比浅层慢很多,最底层 100 cm 处在 70 h 后才有水分响应变化。

同样,土壤负压在第一次灌溉后变化最为显著,变幅最大,而在后面的几次补水入渗中变化不大;在灌溉入渗的同时,随着土壤含水率的增加,土壤负压呈直线式下降,仅在不到一次监测时间(10 min)内土壤负压由 -47 kPa 降至 -10 kPa 以下,说明土壤含水率与负压的关系非常密切;在不同埋深处,土壤负压呈一定规律,即土壤负压随剖面埋深的增加而减小,说明土壤负压不仅与含水率有关,而且也与土壤质地和土中气有一定关系。

土壤电导率在整个试验中变幅较大,在第一次灌溉后,土壤电导率随灌溉入渗呈直线式突变上升,甚至比含水率的变化剧烈,在后面的几次灌溉中,电导率呈一定波动,但变幅不大;在试验中

发现,土壤剖面深度 100 cm 处变化较其他埋深都大,变化最剧烈,这与其他因素不同,值得进一步深入研究。

土壤温度主要受气候条件影响,在土中表现为随气温的增加而增加,但有一定的滞后性,总体是随气候升温而逐渐升高。

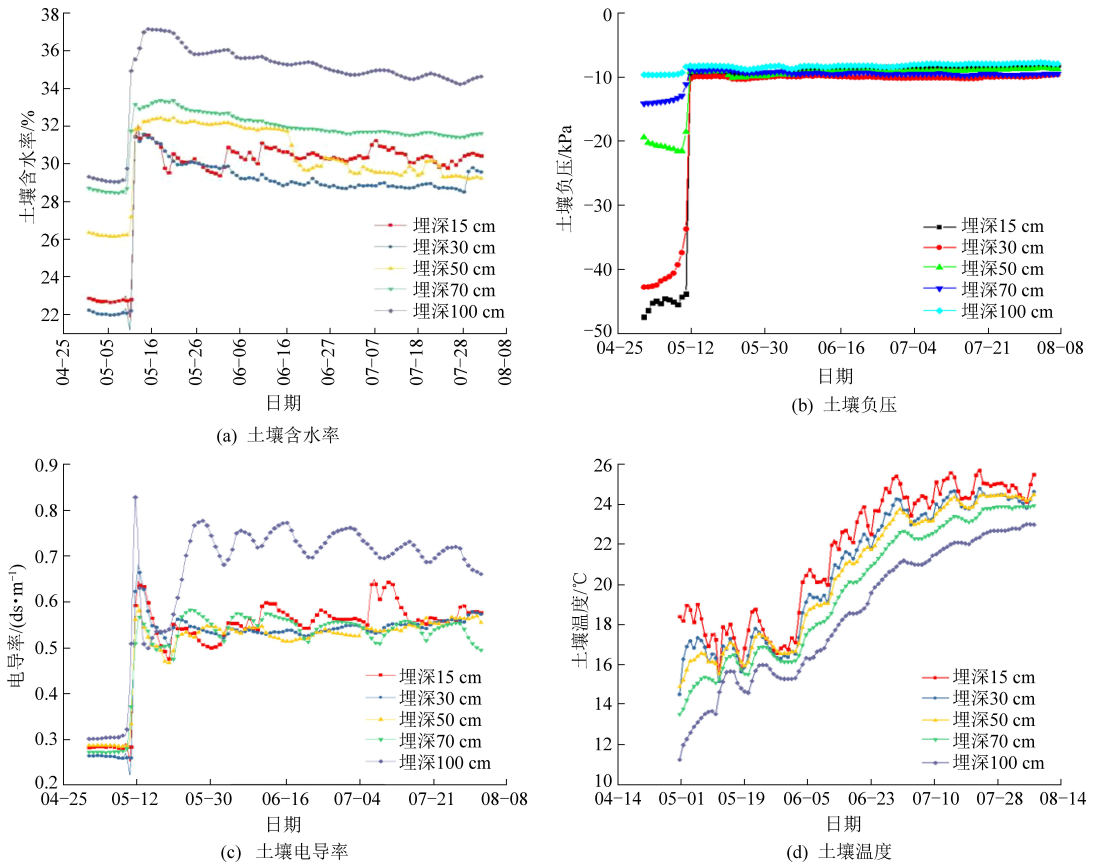


图 3 灌溉入渗试验中各要素随时间的变化

Fig.3 Changes of various factors with time in irrigation infiltration test

### 2.2 灌溉入渗引起的土水变化分析

在整个灌溉入渗中,灌溉入渗分为“初始自然—开始灌溉—灌溉入渗—灌溉完成—自然恢复”五个阶段,分析土壤含水率和负压的变化。结合图 4 可知,在入渗初始阶段入渗量相对较大,含水率随着时间累积不断增大,变幅减小,土壤负压的绝对值不断减小。在土体表层入渗进行中,灌

溉初期土壤初始入渗率高,随后入渗过程逐渐趋于稳定,负压由-48.5 kPa 骤降到正压 9.6 kPa(绝对值);在土体剖面 30 cm 及较深处以下,土壤的含水率和负压变化幅度较小,均呈缓慢增长的趋势,土壤含水率由 28.0% 增长到 36.0%,负压则由 -10.8 kPa 缓慢降至正压 17.4 kPa,说明土壤较深处对灌溉入渗的响应时间较长,更易得到较为平

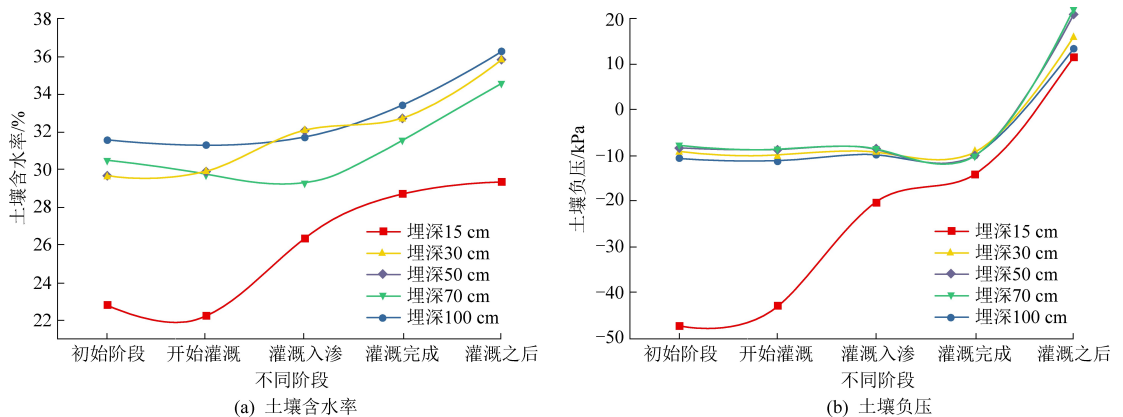


图 4 土壤水分特征点变化

Fig.4 Changes of soil moisture characteristic points



缓的变化过程。另外,在整个试验段中,在浅层“开始灌溉—灌溉入渗”时间段内土壤的含水率和负压是骤变的过程,其他时间段变化幅度较小,说明该段要加密监测才能更精准的反映土水骤变的过程。

分析灌溉试验开始前和结束后的自然时间段的土水特征,可知在水稻田灌溉入渗前,即在初始时刻不同埋深处的含水率和负压呈一定规律,由浅到深含水率逐渐增大,而负压是随埋深逐渐较小;在灌溉入渗后,土壤含水率依旧是随着埋深的加深而增大,而土壤的负压却表现不明显,负压值相对稳定,不受埋深条件影响。

### 2.3 水分特征曲线拟合与分析

通过大量的试验研究,人们已提出了许多经验公式来模拟土-水特征曲线,其中比较常用的有 Brooks-Corey 模型(1964)、V-G 模型(1980)、Frdlund 模型和 Xing(1994)模型等,这些模型中都含有许多待求的参数。在多种经验拟合公式中,V-G 公式模型(Van Genuchten)相对适用范围更广,

拟合度也最佳,采用 V-G 公式模型进行曲线拟合计算<sup>[8-11]</sup>。

Van Genuchten 建议将水分特征曲线拟合公式(1):

$$\theta = \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha|\varphi|^n)]^m} + \theta_r \quad (1)$$

式(1)中: $\theta$  为体积含水率( $\text{cm}^3/\text{cm}^3, \%$ ); $a$ 、 $m$ 、 $n$  为拟合参数, $a$  为与进气值有关的参数; $n$  为曲线形状参数; $\theta_r$  和  $\theta_s$  分别为饱和含水量和残余含水量,为压力水头。令  $m = 1 - 1/n$ ,则可推导出非饱和导水率  $k$  的表达式如式(2):

$$k = k_s \frac{\{1 - (\alpha|\varphi|)^{n-1} [1 + (\alpha|\varphi|^n)]^{-m}\}^2}{[1 + (\alpha|\varphi|^n)]^{m/2}} \quad (2)$$

式(2)中: $k_s$  为某水温下试样的渗透系数, $\text{cm}/\text{s}$ ; $\varphi$  为土水势, $\varphi < 0$ 。

在土壤水分特征曲线拟合中,发现土水实测点值无法利用经验公式拟合得出土壤水分特征曲线,实测点见图5所示。当分别研究不同埋深时的

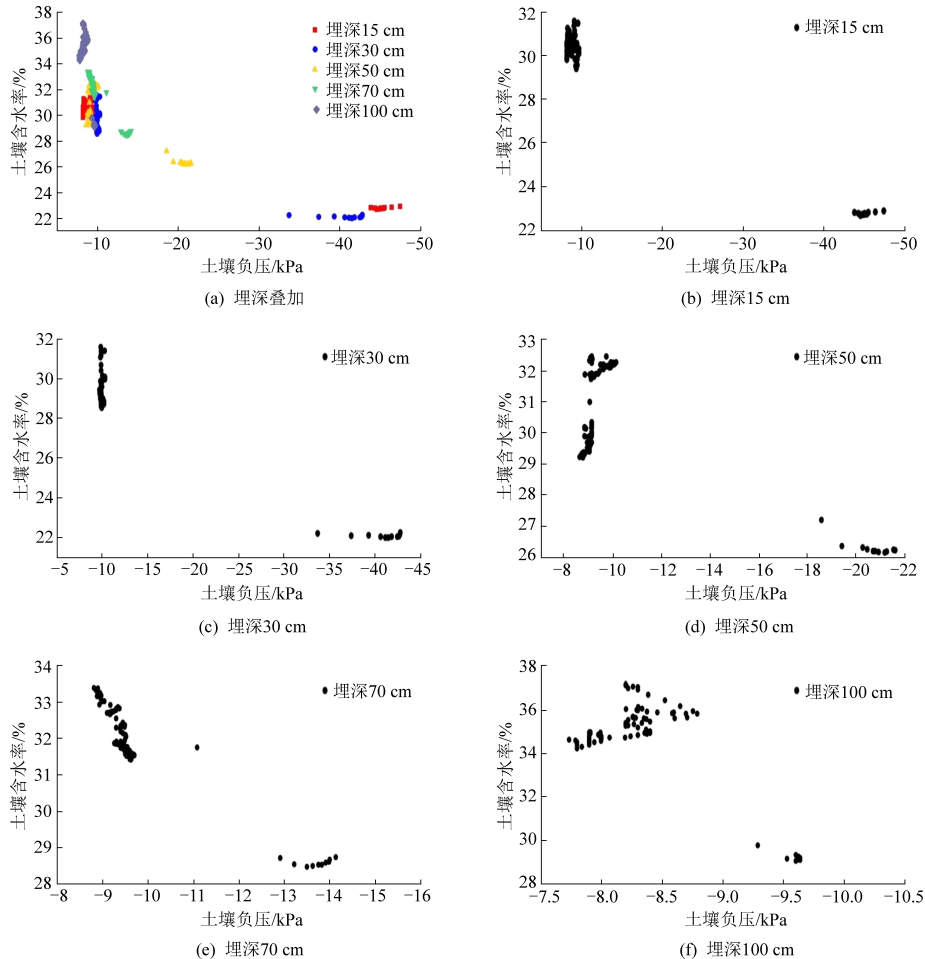


图5 各埋深段土壤水分特征变化点分布

Fig.5 Variation points of soil moisture characteristics in each buried depth

土壤水分特征曲线时,发下实测点均为不连续的点,如埋深 15 cm、埋深 30 cm 和埋深 50 cm 处只有初始和结尾有实测点,在负压 -12 kPa 到 -43 kPa 段是没有含水率实测值的;在埋深 70 cm 和 100 cm 处虽然整体有数据变化点,但变化点杂乱,无曲线趋势特征;只有将所有埋深处的点进行统一处理时,见图 5(a),可以看出土壤含水率与负压呈现一定的变化规律,该图可以说明含水率与负压密切相关,且土壤负压随含水率的变化是突变的,即使在监测中采用每 10 分钟读数采集一次的频率下,监测到的土壤负压由 -40 kPa 突变到 -9 kPa,尤其在土壤浅表层中变化最为明显。

本次试验中,发现在灌溉入渗时,随着土壤水分的入渗运移,土壤的负压是呈突变型的减小,而不是呈一定趋势线的变化,这与以往研究的土水

特征曲线有所不同,故不能用经验公式进行拟合,只能分别研究在整个试验中土壤含水率的变化和土壤负压的变化。在运用典型模型无法拟合得出土水关系曲线时,只能运用数理统计方法对大量的实测数据进行相关性分析,而 SPSS 统计软件是专业的数据统计分析软件,其功能十分强大,可以处理大量纷杂的数据,做出数据分析与处理。

借助 SPSS(Statistical Product and Service Solutions)统计软件进行土壤水分特征的相关性分析可得,在水分入渗过程中土壤负压随之变化,特别是在浅表层,土壤负压与水分的增加呈较好的相关性,并进行皮尔逊相关性分析,可得大多数监测的土水特征点的在 88% 以上(见表 2),表明土壤水分与负压有着密切的关联。

表 2 土壤含水率与负压的相关性分析

Table 2 Correlation analysis between soil moisture content and negative pressure

各埋深段	土壤含水率 1-A	土壤水势 2-A	土壤含水率 1-B	土壤水势 2-B	土壤含水率 1-C	土壤水势 2-C	土壤含水率 1-D	土壤水势 2-D	土壤含水率 1-E	土壤水势 2-E	
土壤含水率 1-A	皮尔逊相关性 Sig.(双尾) 个案数	1 .000 94	.985** .000 94	.958** .000 94	.981** .000 94	.875** .000 94	.982** .000 94	.848** .000 94	.957** .000 94	.888** .000 94	.836** .000 94
土壤水势 2-A	皮尔逊相关性 Sig.(双尾) 个案数	.985** .000 94	1 - 99	.946** .000 94	.996** .000 99	.759** .000 94	.994** .000 99	.837** .000 94	.963** .000 99	.882** .000 94	.850** .000 99
土壤含水率 1-B	皮尔逊相关性 Sig.(双尾) 个案数	.958** .000 94	.946** .000 94	1 - 94	.953** .000 94	.874** .000 94	.941** .000 94	.934** .000 94	.964** .000 94	.941** .000 94	.752** .000 94
土壤水势 2-B	皮尔逊相关性 Sig.(双尾) 个案数	.981** .000 94	.996** .000 99	.953** .000 94	1 - 99	.783** .000 94	.991** .000 99	.868** .000 94	.980** .000 99	.910** .000 94	.851** .000 99
土壤含水率 1-C	皮尔逊相关性 Sig.(双尾) 个案数	.875** .000 94	.859** .000 94	.874** .000 94	.883** .000 94	1 - 94	.840** .000 94	.936** .000 94	.832** .000 94	.904** .000 94	.840** .000 94

续表

各埋深段	土壤含水率 1-A	土壤水势 2-A	土壤含水率 1-B	土壤水势 2-B	土壤含水率 1-C	土壤水势 2-C	土壤含水率 1-D	土壤水势 2-D	土壤含水率 1-E	土壤水势 2-E	
土壤水势 2-C	皮尔逊相关性	.982 **	.994 **	.941 **	.991 **	.880 **	1	.835 **	.958 **	.882 **	.877 **
	Sig.(双尾)	.000	.000	.000	.000	.000	-	.000	.000	.000	.000
	个案数	94	99	94	99	94	99	94	99	94	99
土壤含水率 1-D	皮尔逊相关性	.848 **	.837 **	.934 **	.868 **	.936 **	.885 **	1	.935 **	.987 **	.835 **
	Sig.(双尾)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	-	.000	.000	.000
	个案数	94	94	94	94	94	94	94	94	94	94
土壤水势 2-D	皮尔逊相关性	.957 **	.963 **	.964 **	.980 **	.832 **	.958 **	.935 **	1	.965 **	.818 **
	Sig.(双尾)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	-	.000	.000
	个案数	94	99	94	99	94	99	94	99	94	99
土壤含水率 1-E	皮尔逊相关性	.888 **	.882 **	.941 **	.910 **	.904 **	.882 **	.987 **	.965 **	1	.912 **
	Sig.(双尾)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	-	.000
	个案数	94	94	94	94	94	94	94	94	94	94
土壤水势 2-E	皮尔逊相关性	.866 **	.850 **	.852 **	.851 **	.840 **	.877 **	.875 **	.868 **	.882 **	1
	Sig.(双尾)	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	-
	个案数	94	99	94	99	94	99	94	99	94	99

\*\* .在 0.01 级别(双尾),相关性显著。

### 3 结 论

通过研究人工回灌条件下的水分运动特征,分析不同要素在灌溉入渗后随时间变化响应,发现土壤中含水率、负压、土温等要素均具有一定规律性,含水率与负压的关系较为密切,负压变化幅度较大,测试难度也大,总结如下:

(1)分析土壤含水率、负压、电导率等变量随灌溉入渗时间的变化特征和沿剖面埋深的变化规律,发现土壤含水率和负压的变化是瞬时性的;在整个长时间灌溉入渗中发现,土壤水分与负压的响应变化在灌溉入渗试验前期就已基本完成。

(2)在土壤水分特征曲线拟合中,发现常用的 V-G 模型曲线无法利用经验公式拟合,但相关性较强;而通过 SPSS 数理统计进行皮尔逊相关性分

析,分析结果较好,其相关性在 88% 以上。

(3)在分析含水率与负压密切相关发现,研究区的土壤负压随含水率的变化是存在突变现象,即使在监测为 10 min/次频率中也无法测得变化过程,建议在今后的工作中需进一步加密试验前期的监测频率。

### 参考文献

- [1] Haim Gvirtzman, Eyal Shalev, Ofer Dahan, et al. Large-scale infiltration into unsaturated stratified loess sediments: Monitoring and modeling [J]. Journal of Hydrology, 2008, 349: 214-229.
- [2] 汪可欣, 王丽学, 吴佳文, 等. 不同耕作方式对土壤耕作层水、肥保持能力及玉米产量的影响分析 [J]. 中国农村水利水电, 2009 (5): 53-59.
- [3] 韩占涛, 荆恩春, 李向全, 等. 宁夏清水河平原农田包气

- 带水分运移特征分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25 (4): 138-142.
- [4] 商洁. 巴丹吉林沙漠腹地包气带水分运移研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2014: 35-46.
- [5] 高游, 孙德安. 单峰和双峰土水特征曲线基本参数的确定 [J]. 岩土工程学报, 2017, 39 (10): 1884-1891.
- [6] 于洋, 韩鹏, 林溢. 半干旱地区包气带-饱和带水盐耦合模拟 [J]. 干旱区研究, 2017, 34 (4): 741-747.
- [7] 王文科, 宫程程, 张在勇, 等. 旱区地下水文与生态效应研究现状与展望 [J]. 地球科学进展, 2018, 33 (7): 702-718.
- [8] 谭晓慧, 余伟, 沈梦芬, 等. 土-水特征曲线的试验研究及曲线拟合 [J]. 岩土力学, 2013, 34 (S2): 51-56.
- [9] 林群仙, 李少和. 基于两种粉质粘土的土水特征曲线试验对比分析 [J]. 科技通报, 2018, 34 (8): 182-184.
- [10] 王成文. 包气带弱透水性夹层对入渗补给的阻水减渗效应研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2016: 38-55.
- [11] Van-Geneuchten M Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44: 892-898.