DOI:10.19789/j.1004-9398.2023.01.013
文献引用:孙晓庆,卞建民,罗建男,等.新工科背景下土壤水分下渗实验优化设计[J].首都师范大学学报(自然科学版),2023,44(1):89-96.
SUN X Q,BIAN J M,LUO J N,et al. Optimization design of soil moisture infiltration experiment under the background of new engineering [J]. Journal of Capital Normal University(Natural Science Edition),2023,44(1):89-96.

新工科背景下土壤水分下渗实验优化设计*

孙晓庆[1,2],卞建民[1,2**],罗建男[1,2],杜新强[1,2],马 喆[1,2],郝 洋[1,2]

(1.吉林大学新能源与环境学院,吉林 长春 130021;2.吉林大学地下水资源与环境教育部重点实验室,吉林 长春 130021)

摘要:为顺应新时代对大学生创新探索能力的培养要求,实验工程教育专业认证中实验教学环节目标由“掌握知识”逐渐转变为“培养能力”。基于该教育理念,本文优化水文学原理课程实践教学环节的土壤水分下渗实验内容,在原有定水头供水下渗基础上,补充探索性的实验内容,设计变水头供水土壤水分下渗实验,揭示土壤水盐动态规律的驱动机制;充分调动学生开展实验研究的积极性,加深理解实验原理及其背后的科学理论;并充分挖掘实验数据内涵,培养学生缜密的科研思维、激发学生的实践创新意识。

关键词:新工科;实验教学;实验优化;水分入渗;水盐动态;驱动力
中图分类号:P334;G420 **文献标识码**:A

Optimization design of soil moisture infiltration experiment under the background of new engineering*

SUN Xiaoqing[1,2], BIAN Jianmin[1,2**], LUO Jiannan[1,2], DU Xinqiang[1,2], MA Zhe[1,2], HAO Yang[1,2]

(1. College of New Energy and Environment, Jilin University, Changchun Jilin 130021;
2. Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment, Ministry of Education, Jilin University, Changchun Jilin 130021)

Abstract: In order to meet the requirements of the new era for the cultivation of college students' innovative and exploratory ability, the objects for experimental teaching in the experimental engineering education professional certification have slowly altered from “mastering knowledge” to “cultivating ability”. Based on this educational concept, the content of the soil moisture infiltration experiment in the practical teaching link of the hydrology principle course is optimized in this paper, the exploratory experiment content is supplemented on the basis of the original constant head water supply infiltration, and the soil moisture infiltration experiment of the variable head water supply is designed to reveal the driving mechanism of the dynamic law of water and salt in the soil. This paper carries out the enthusiasm of students about the experimental research fully, and deepens the understanding of experimental principles and the scientific theories behind them. The connotation of

收稿日期:2021-11-26
* 吉林省高等教育教学改革研究(一般)课题(JGJX2022D26);吉林大学校级教学改革研究(一般)课题(2021XZC069);吉林大学校级教学改革研究(重点)课题(2021XZD044);吉林省高等教育教学改革研究(重点)课题(JLDQ774720190722201753)
** 通信作者:bianjm@jlu.edu.cn

experimental data is fully mining, it is helpful to cultivate students' meticulous scientific research thinking and stimulate students' sense of practice and innovation.

Keywords: new engineering; experimental teaching; experimental optimization; moisture infiltration; water and salt dynamics; driving force

CLC: P334; G420 **DC**: A

0 引 言

2016年"新工科"概念提出后受到了工程教育界的广泛关注,我国工程教育将其称之为"新革命"。新工科是指新的工科形态,对工科注入新的内涵,以适应新经济发展需要[1]。在《教育部高等教育司关于开展新工科研究与实践的通知》中,教育部将新工科的主要研究内容归纳为工程教育的新理念、学科专业的新结构、人才培养的新模式、教育教学的新质量和分类发展的新体系等[2]。

自2017年2—6月,经历了"复旦共识""天大行动"到"北京指南"等阶段后,新工科建设的序曲奏响了,经过多年来的实践和理论探索,第一批成果已经涌现,由此,新工科建设背景下的高等工程教育改革已然进入到了一个新的阶段[3]。新工科教育重要的使命之一就是要培养学生持续学习新技术的能力和习惯,积极探索建立工程教育的新理念,发挥教育学科的理论引领研究是新工科研究的趋势和选题[4-5]。为推进新工科的快速发展,近些年来我国积极开展工程教育认证,以学生体系发展为中心的成果导向教育(outcome based education, OBE)理念贯彻其中,已引起专家学者的广泛关注。在新工科背景OBE教学理念引领下,充分考虑每个学生的个体差异和专长特点,加大学生创新能力的培养,关注学生在完成学习过程后达到的技能,成为教育工科学生的新方向。以学生的学习成果为起点,设计实践教学大纲,通过理论与实践相结合,以及多元化的教学等,充分调动学生学习的积极性和主动性。以新工科背景下OBE理念为导向的学生能力培养模式的实践教学方法,为新工科背景下高校提升人才培养质量提供了一条值得借鉴的可行途径[6-7]。

实验是工科专业本科教学的重要组成部分,基于工程教育专业认证要求的实验教学改革,最重要的是教学理念的转变,即由"掌握知识"到"培养能力"的转变,学生不仅掌握课本知识,同时培养学生实践、创新和解决复杂问题的能力[8-12]。水文学原理是水文与水资源工程等相关专业基础教学的重要学科,其实验教学环节对于学生思维和素质的协调发展至关重要[13],以往其实验教学内容仅涉及验证性实验环节,针对干燥土壤介质,模拟定水头供水下渗过程,并拟合经验曲线。为丰富实验内容,更好地实践新工科背景下的教育理念,达成新时代对大学生创新探索能力要求的培养目标[14-19],有必要将验证性土壤水分入渗实验拓展为综合设计研究探索性实验项目,理论结合实际,设计变水头积水下渗过程的水盐动态实验,涵盖入渗过程的土壤负压水头与温度等多因素监测数据,解析水盐运移的驱动机制,激发学生创新性思考,开拓思维,把握科研创新的基本思路和方法[20-23]。随着我国工程教育认证工作的推进,有效保障了高等教育对学生综合素质培养目标的实现[24-26],而基于新工科背景下的实验教学体系改革与实践,通过对实验教学内容的分层系统化设计,保证工程教育认证理念的有效实施,对于新工科背景下高校人才培养质量的提升具有重要实际意义。

1 下渗实验优化设计

1.1 下渗实验原理及优化必要性

地面积水在分子力、毛管力和重力作用下,进入土壤孔隙,被土壤吸收,补充土层缺乏的水分,这种过程叫下渗。单位时间内单位面积上渗入土壤中的水量,称为下渗率或下渗强度。土壤分子力、毛管力和重力作用下,土壤水从地表渗入地下的运动过程中,随着土壤水分增大,分子力和毛管力减小,当水分充满毛管孔隙而达到饱和时,重力是下渗过程的主要驱动力。降雨强度、地面植被度和植被种类、土壤物理特性、温度和水质等是影响下渗的主要因素。实验中通过对观测实际问题取得的下渗数据,选配以合适的函数形式,并率定其中的参数,从而求得相应的下渗曲线经验公式,常用的是Kostiacov公式[27]。下渗公式在农田灌溉计算和降雨产流分析中均有重要应用。

原下渗实验设计,采用马氏瓶定水头供水,利

用实验室内均质粉质细砂作为下渗介质,开展定水头供水条件下的均质介质下渗过程研究,观察并记录下渗过程中下渗水量的变化及浸润曲线的迁移距离,待土柱底端界面产生连续水滴渗出,实验结束。整个下渗过程经历了渗润、渗漏及渗透3个阶段。实验过程设计简单,条件单一,介质理想,学生实验过后无法了解实验的完整性过程,包括对样品采集、处理及介质理化性质的认识等均未体现在实验过程中。此外,对于实验数据的分析处理仅停留在规律认识层次,没有深入挖掘现象背后的本质原因,缺乏对于本科生科研思维的引领及推动。因此,有必要针对实验完整性、实验情景及实验分析等环节开展内容的优化设计,深入贯彻并体现新工科的全面性教育理念。

1.2 实验设计优化内容

本实验方案的设计,优化了原定水头持续供水的单一控制条件,拓展了原实验探究土壤水分下渗能力的实验内容,积极推动学生的持续学习与思考,丰富实验内容,设定高水平的实验目标,将以往定水头更改设定为变水头供水条件,激发学生的创新思维,引导学生深入思考,探究盐渍化土壤水盐下渗规律,分析盐渍土贮存与传输水分的能力,深入阐释蒸发条件下供水水头逐渐降低时,土壤不同深度的温度及负压水头对水盐动态的驱动效应。基于下渗实验的实验原理,与原下渗实验内容设计的不足,本文针对该实验内容主要优化以下3个实验环节:

(1)变水头供水情景优化。针对以往下渗实验的定水头供水情景简单,与自然界降水或灌溉等地面积水变水头供水实际入渗过程脱节的现象,优化设计变水头供水下渗实验情景,综合考虑蒸发和下渗的叠加作用,开展下渗规律及驱动因素影响分析。基于此,提升本科生解决自然界实际问题的能力,满足设计研究探索性实验的教学需求。

(2)采样及处理环节优化。针对以往水文学原理下渗实验内容设计中,对土样采集过程及装填土柱介质理化性质分析部分的缺失,补充介绍野外样品采集方法、原则,与室内土样理化性质测试等,完整呈现实验前期准备工作,开展分层土样的天然密度、含水率及颗粒分级等测试。对于未开展过实际科研工作的本科生,极有必要针对实验内容的完整性作重要介绍,使其了解实验设计的系统性。

(3)系统性数据处理分析优化。针对以往下渗实验结果仅获取下渗量及下渗率随时间变化曲线的单一性,系统优化实验数据的监测及数据处理方案,变水头供水下渗过程中,补充实时监测各层土样的温度、负压水头、土壤体及土壤孔隙水电导率数据,推求下渗曲线基础上,分析下渗过程中相关监测指标的动态分布,并在土壤水盐迁移机制的一般理论基础上,深入探究温度梯度及负压梯度对水盐变化的驱动影响,提升本科生开展综合实验及数据系统化处理的能力,达到设计研究探索性实验的实训目的。

1.3 预实验设计

针对实验优化方案,本文开展了本科教学变水头供水下渗的预实验研究,系统地开展了优化实验内容的实际操作,初步获得实验监测数据,按照优化设计,分析了优化情景下的下渗规律、水盐动态分布及驱动因素影响,为本科教学的实验优化方案实施提供讲解实例。通过优化设计实验方案和分析内容,激发学生的探索性创新思维。

1.3.1 教学目标

通过教学实验使学生深刻认识和掌握下渗规律,学会通过实验方法检验下渗规律,同时通过实验样品采集环节的介绍及土样理化性质的检测,呈现实验教学过程的完整性。对下渗理论理解的基础上,明晰变水头供水条件下的水盐动态迁移过程,学会透过现象挖掘本质的科研思维,在重力和土壤介质毛细力共同作用下驱动水分下渗,水分运动和盐分浓度差共同作用于盐分运移的理论认识基础上,结合温度及负压梯度深入阐释水盐动态的驱动机制。

1.3.2 样品采集与方案设计

实验土样取自吉林西部大安地区的盐渍土,地面以下每20 cm取1剖面,合计5层,依次记为P1~P5,各层同时采集环刀和铝盒样品,用于土样初始含水率及密度测定。采集后的土样运送至实验室内风干,去除杂质后粉碎,备用。

本实验中,设计变水头供水下渗装置见图1,设置2排观测孔,一排用于安装土壤负压计(2000型),测试获得各土层负压水头,一排用于土壤传感器(英国Delta-T)仪器安装,可测各层土壤的指标包括含水率、温度、孔隙水电导率及土壤体电导率。结合实验过程中地表供水水头变化及其他各监测指标数据,分析水分下渗规律及盐分动态分布,解析水盐动态驱动因素。实验方案设计如下:

(1)土柱装填及初始实验环境。测定土样的初始含水率及湿密度,计算获得各土层的干密度,采用各层风干粉碎后的土样,按此干容重装填土样。实验供水界面设定为蒸发条件下的自由下渗,即变水头供水。采用变水头供水下渗实验装置,按照每层剖面的干密度装填土柱,由下至上浸润土壤介质,采用土壤电导率/水分/温度传感器测定仪实时监测土含水率,满足土壤初始含水率后开始实验,此时关闭底部供水箱的入水阀门,停止底部给水,模拟包气带水分下渗情景,下渗过程中柱体底部边界接触饱水层的上边界,由于进水阀门的关闭,底端边界为不与外界大气相连接的静态饱水区。

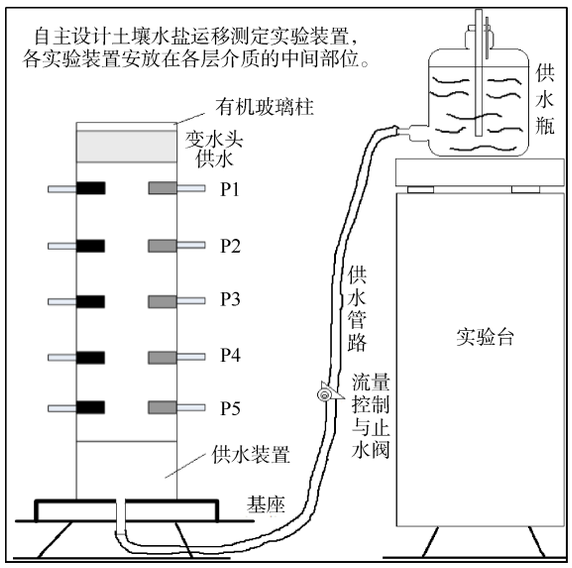
(2)变水头设置及实验过程控制。为实现实验的具象化,结合采样区水田灌溉实际情景,设计初始地表供水水深5 cm,加深学生对实验的目的指向性理解。地表供水在蒸发和下渗共同作用下水深逐渐降低,将定水头实验改为符合实际条件的变水头,水深为0时停止实验。关闭底部供水时,以每天2次的频率,开展实验指标测定,共实验14 d。监测指标包括供水水面下降距离、各层土壤含水率、电导率、温度及负压数值,其中,各层土壤电导率可同时获取孔隙水电导率及土壤体电导率数值。实验中通过量取随时间变化的有机玻璃柱表面供水层厚度变化,即可计算出水面下降距离获取下渗量,本实验中以水面下降距离代表下渗量。通过一定时间的下渗量与时间的比值,可获得不同时间点的入渗率变化。因土壤介质的性质影响下渗运移的速度,若将该实验模式应用于有限学时的实践教学中,需将采集的土样替换为孔隙度较大的易于下渗的介质。

2　预实验教学结果与讨论

依据变水头土壤水分入渗实验优化方案设计,以学生为主导,教师讲解辅助,开展水分入渗实验,借助土壤剖面不同位置水盐动态变化监测数据,引导学生探讨变水头供水过程水盐变化规律,解析负压水头及温度变化的驱动效应,将此实验内容首先应用于本科生大学生创新项目,推动学生对实验数据揭示的本质问题深入阐释,激发创新思维意识。

2.1　变水头供水水分下渗规律

下渗实验数据处理之前,引导学生查阅相关文献,总结土壤水分入渗的经验或半经验模型。目前已有很多学者开展了大量土壤水分入渗规律的相关研究,总结了多个土壤水分入渗模型,包括基于物理意义的模型、半经验模型和经验模型等3类。其中经验模型因参数少,计算简便而应用广泛,本预实验中获得的经验模型为Kostiacov积水入渗模型[13],在实验报告中要求学生厘清使用模型的适用条件,阐释模型原理。



注:有机玻璃柱左侧为土壤含水率、温度、电导率测定装置;右侧为负压测试装置;P1~P5为顶部至底部的土壤分层。

图1　土壤电导率/水分/温度传感器测定仪与实验装置示意

累积下渗量通过量测积水水头变化获取,与时间相比获得入渗率,根据变水头供水下渗实验数据,指导学生绘制入渗率与累积入渗量变化曲线(图2)。

通过实验过程观测数据,采用Excel的拟合趋势线功能,基于累积入渗量及入渗率随时间的散点分布,获得趋势线拟合公式。累积入渗量随时间变化的趋势线符合线性关系,而土壤入渗率随时间变化曲线拟合的函数关系分别符合幂函数,拟合系数可达0.913 8。对比各经验模型的公式形式,符合积水入渗Kostiakov模型,公式为

$$i = ant^{n-1},$$

式中:i是入渗率,a、n与土壤质地、初始含水率等有关的参数,t为积水时间。对比入渗率散点分布趋势线关系式与模型函数关系式,可获得变水头下渗模型具体函数关系式及参数a、n值,分别为0.072、0.753。

通过对变水头供水下渗实验中下渗曲线的绘制及经验公式的检验,及参数的推求过程等,引导学生学会对实验基础数据的处理方法,并深入思考并揭示数据背后隐藏的规律性。

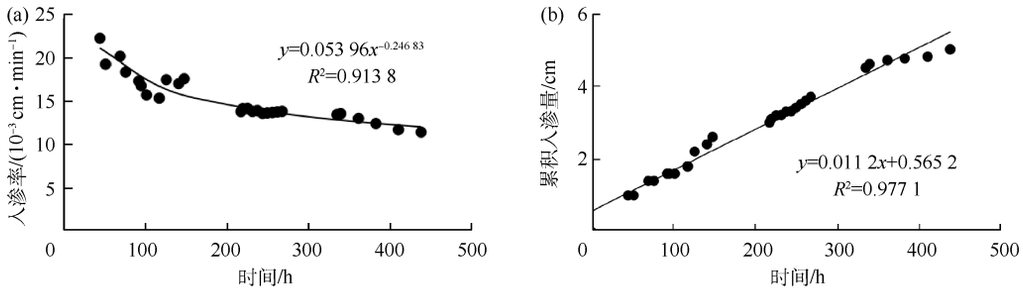


图 2　变水头下渗实验拟合趋势线

(a)土壤入渗率随时间变化曲线;(b)累积入渗量随时间变化曲线

2.2　系统化下渗过程水分盐分动态分析

在水分下渗规律分析基础上,系统化刻画下渗过程中水分盐分动态,引导学生针对实验全面思考,丰富实验分析过程。根据预实验结果,变水头供水条件下水分下渗阶段P1~P5层土壤含水率随时间变化情况,见图3。土壤水分下渗影响着土壤剖面盐分的再分配状态,实验初始时刻(图中的0时刻起点)各层土壤的电导率值代表盐分背景含量。随土壤水分入渗,表层土壤具有较强的水分贮存能力,深层土壤具有更强的水分传输能力。由图4,土壤上层(P1、P2)土壤孔隙水盐分变化较为明显,土壤下层(P3、P4、P5)孔隙水盐分含量由大到小排序为P3>P4>P5。P3~P5土壤孔隙水盐分下渗运移通量得到土壤体盐分的补充,下渗与补给达到动态平衡[13]。

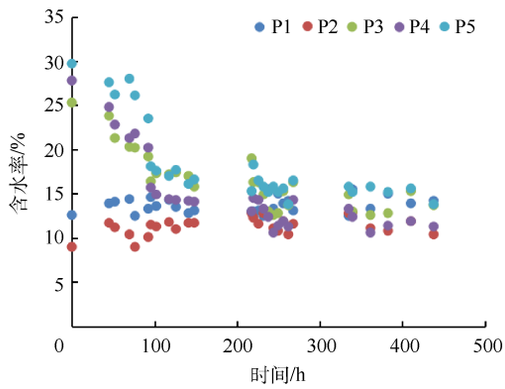
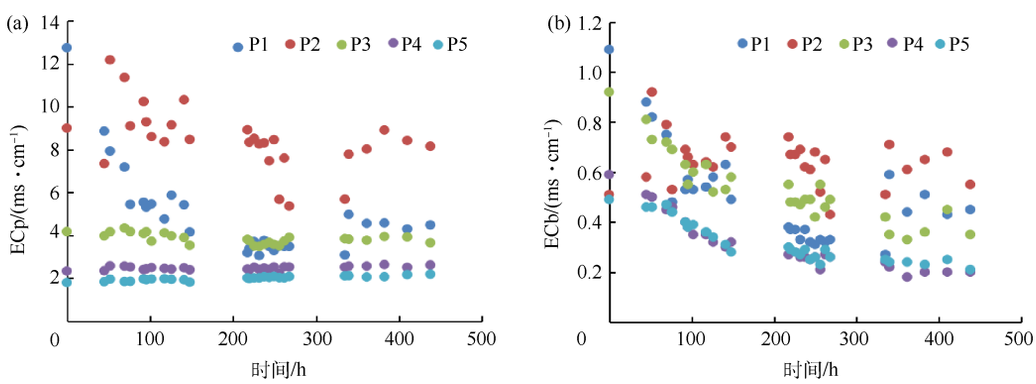


图 3　土壤剖面P1~P5含水率变化曲线

对比原定水头下渗实验方案,除推求下渗曲线外,难以获得分层介质盐分的动态规律,实验结果单一,无法实现系统性的数据处理过程。本预实验中,水分下渗规律分析基础上,鉴于实验土层介质的特殊性,及盐渍土盐分含量较高的特点,水分迁移驱动盐分动态变化,基于观察的实验数据,绘制数据点分布,据此分析其动态规律,可揭示各指标间的相互联系。

2.3　拓展水盐动态驱动因素解析

水分下渗规律及水盐动态分布分析基础上,引导学生思考表象信息背后的驱动因素,水文学中多数情况下,可以假定自然界中的驱动力主要是机械力,包括重力和压力梯度,而盐分运移是水分运动和盐分浓度差的共同作用的结果。然而,多孔介质中的水分运动受其他因素影响,包括热力作用、渗透作用等,如非饱和土壤中的温度改变,可能引起



注:ECp为土壤孔隙水电导率,ECb为土壤体电导率。

图 4　P1~P5土壤电导率变化情况

(a)孔隙水;(b)土壤体

表面张力的变化,进而影响给定含水量的压力,最终影响液体运动[28],基于此,本文结合实验中获得的负压和温度测试数据,探究驱动关系的演变规律,激发学生的深入思考能力和创新思维方式。实验土柱各层负压由负压计测得,换算为水头值(1 kpa约等于10 cm水头值),负压水头梯度由各时间节点测试所得负压值,换算为对应的水头值,与土壤介质各层间距作比获得;各层温度值由土壤电导率/水分/温度传感器(英国 Delta-T)仪器测试获得,与负压水头梯度同样的计算方法得温度梯度值。

2.3.1　负压水头梯度的驱动分析

引导学生深入探究下渗过程中水盐动态规律背后的驱动因素,绘制各层负压水头值随时间变化趋势,由趋势变化总结P1~P5各层随下渗进行的负压变化对各层含水率变化的驱动效应。采用负压计测量实验过程中P1~P5各层观测点的负压水头值变化,计算P2~P5各层的负压水头梯度与对应观测点的含水率变化相关关系,见图5。基于实验中各土层含水率与负压水头梯度变化,随着负压水头梯度的降低,P3层含水率逐渐降低,其余P2、P4、P5各层的含水率受负压梯度的变化范围为-5~5 cm/cm,呈现聚集态。综合分析,考虑控制变水头水分入渗下各土层含水率动态变化的驱动因素,蒸发与入渗作用下,积水水头逐渐降低,表层入渗驱动逐渐减小;深层渗漏驱动下,底层含水率变化幅度较大,中部土层因表层入渗与深层渗漏驱动相对较弱。因此,P3层负压水头梯度与含水率变化相关关系显著。

在负压水头值梯度与下渗过程水分变化关系分析基础上,引导学生进一步深入思考以水分为载体的盐分,其迁移动态与负压水头梯度之间的内在相关关系。本预实验中,基于各土层负压水头值梯度与土壤孔隙水、土壤体电导率数据监测值,绘制相关关系散点分布,见图6。对比分析,P2层的土壤孔隙水与土壤体电导率与负压水头梯度关系趋势较为一致,电导率变化对负压水头梯度较为敏感,此外,P4层的土壤体电导率具有相似的规律分布,P3层的土壤体电导率变化受负压水头梯度驱动的效应与含水率变化规律一致。

2.3.2　温度梯度的驱动分析

在分析水盐动态分布的驱动因素时,要引导学

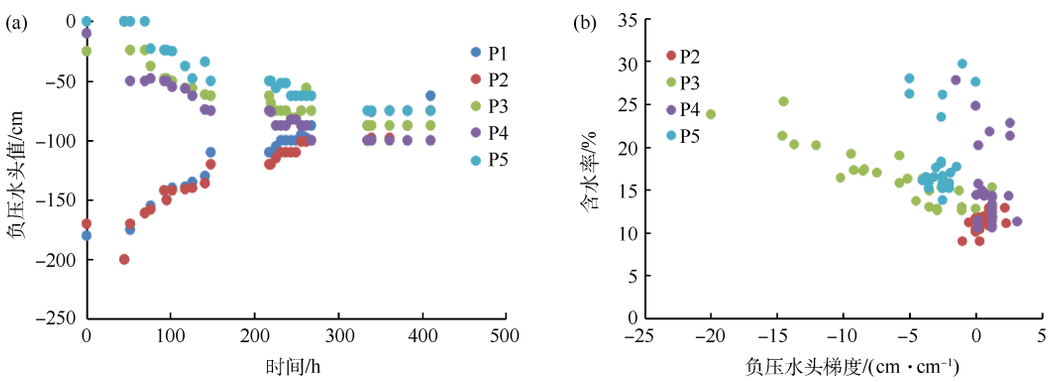


图5　P1~P5土壤负压水头变化及其与含水率的散点图

(a)各层介质负压水头值变化过程散点图;(b)P2~P5负压水头梯度变化下含水率散点分布图

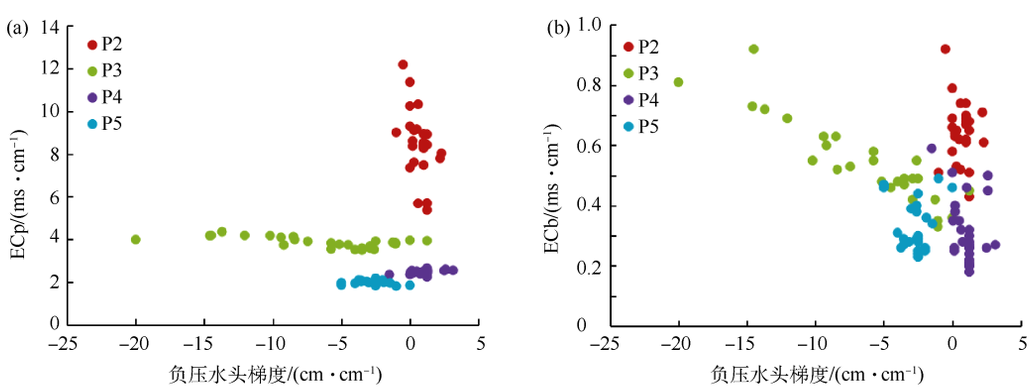


图6　负压水头变化与土壤电导率的相关关系

(a)孔隙水;(b)土壤体

生考虑问题的全面性,负压水头值分析之后,深入考虑温度梯度是否对下渗过程的水分与盐分动态具有一定的驱动作用。实验过程在室内进行,土壤表面供水温度受室内气温影响如图7(a)所示,P1~P5土层土壤温度在实验前期温度相对较低(17.00~19.25℃),实验中期温度上升(18.25~19.80℃),实验后期温度下降(17.00~19.00℃)。土壤温度变化与含水率的关系见图7(b),土壤温度梯度变化与土壤孔隙水和土壤体的电导率关系见图8,温度变化都不具有显著的驱动效应。

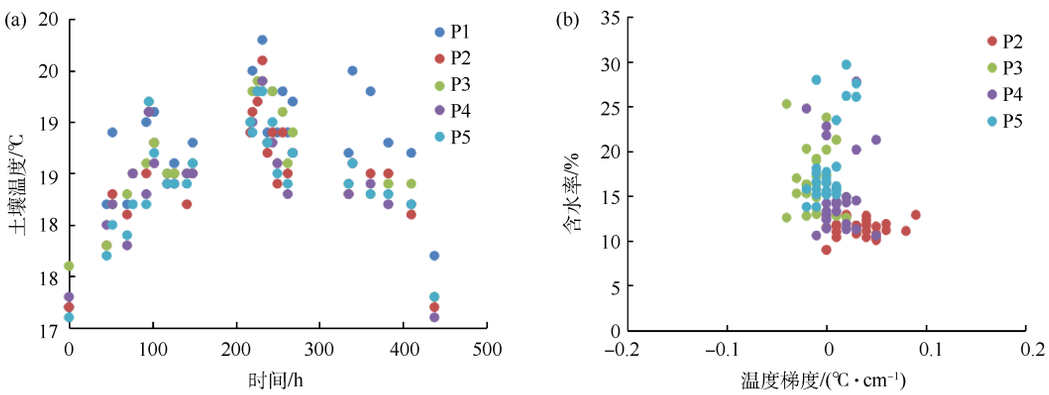


图7　各层土壤温度变化及其与含水率的相关关系

(a)各层温度值变化过程散点图;(b)P2~P5介质温度梯度变化下含水率散点分布

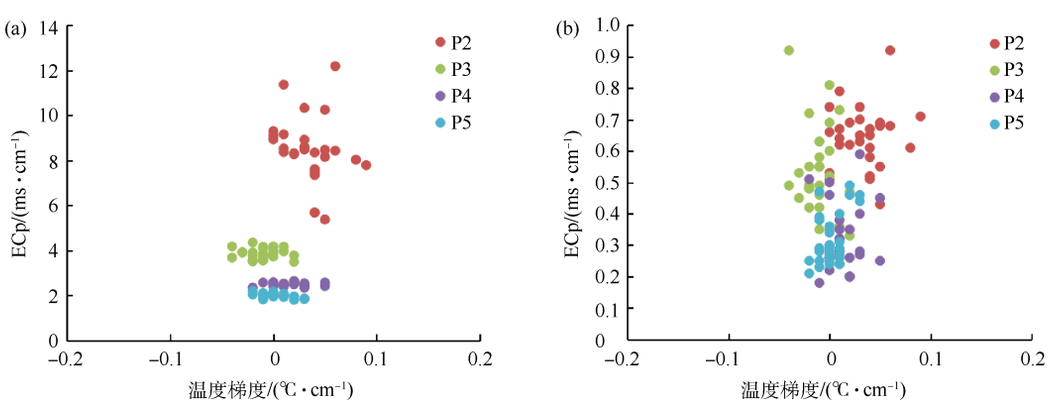


图8　P2~P5土壤温度梯度变化与土壤电导率的相关关系

(a)孔隙水;(b)土壤体

综合水盐动态驱动因素解析,基于下渗实验过程中负压水头梯度、温度梯度与各层水盐的动态分布过程及其相互关系,综合全面解析水盐迁移的驱动机制,分析重力作用及盐分浓度差等水盐动态常规影响因素之外的驱动要素,引导学生形成透过现象揭示本质的科研意识,激发创新思维。

3　结束语

本文基于变水头水分下渗实验研究,拓展了定水头土壤水分下渗实验内容,采用盐渍土作为水流介质,开展蒸发与积水下渗共同作用下水盐动态分布规律及驱动力分析,解析了变水头积水水分入渗规律,重点阐释了水盐运移与负压水头梯度、温度梯度的驱动效应。通过变水头供水水分下渗实验的设计与开展,对于学生实践能力提升具有推动作用。在水分动态规律分析基础上,拓展土壤盐分运移趋势分析,解析了水盐迁移的驱动机制,系统深入的实验课程体系建设,不但有助于学生综合思考能力与创新意识的激发,且符合工程教育专业认证对新工科实践教学环节教学内容与理念改革的时代要求。

参 考 文 献

[1] 李华,胡娜,游振声.新工科:形态、内涵与方向[J].高等工程教育研究,2017(4):16-19+57.

[2] 张永新,伍临莉,赵秀英.基于“新工科OBE理念”模式信息技术学生培养方法研究[J].现代职业教育,2020(45):12-13.

[3] 李建林,王心义,王燕,等.基于工程专业认证的河流动

力学实验教学改革研究[J].焦作大学学报,2020,34(4):113-116.
[4] 吕伟才,方新建,杨旭,等.新工科背景下测绘工程专业创新型人才培养研究与实践[J].测绘工程,2021,30(4):70-75.
[5] 刘坤,陈通.新工科教育治理:主体构成与框架建构[J].教育科学,2020,36(4):63-69.
[6] 陈燕.新工科研究进展与前瞻[J].天津大学学报(社会科学版),2020,22(3):214-222.
[7] 肖赛金,黄海清,徐丽,等."新工科"背景下化学工程与工艺实验教学改革[J].西南师范大学学报(自然科学版),2021,46(7):191-195.
[8] 吴巧云,李仁治.以工程教育认证理念为导向的土木工程实验教学体系改革探讨[J].高等建筑教育,2020,29(3):159-167.
[9] 肖赛金,黄海清,徐丽,等."新工科"背景下化学工程与工艺实验教学改革[J].西南师范大学学报(自然科学版),2021,46(7):191-195.
[10] 李正,张健,王冰,等.工程认证理念下环境工程专业实验教学体系的设计与构建[J].科技风,2020(33):125-126
[11] 张永新,伍临莉,赵秀英.基于"新工科OBE理念"模式信息技术学生培养方法研究[J].现代职业教育,2020(45):12-13.
[12] 李华,胡娜,游振声.新工科:形态、内涵与方向[J].高等工程教育研究,2017(4):16-19+57.
[13] 孙晓庆,卞建民,赵玉红,等.盐渍土水分下渗能力及水盐动态运移试验[J].实验室研究与探索,2021,40(2):12-17.
[14] 范军亮,张富仓.负水头条件下的土壤水分垂直一维入渗特性研究[J].土壤学报,2010,47(3):415-421.
[15] 虎胆·吐马尔白,靳志锋,李文娟,等.北疆土壤温度变化对滴灌棉田水盐运移规律的影响研究[J].干旱地区农业研究,2014,32(2):217-221.
[16] 陈宗芳.吉林西部盐渍土冻结温度预测及水盐迁移规律研究[D].长春:吉林大学,2020.
[17] 梅芹芹,龚绪龙,史雅栋,等.江苏沿海盐渍土盐渍化程度及其影响因素分析[J].工程地质学报,2020,28(5):959-965.
[18] 王银环,刘霞,胡小东,等.盐渍化灌区耕地-荒地-沙地水盐分布及盐分累积特征[J].干旱地区农业研究,2020,38(4):207-214.
[19] 马波,周青云,张宝忠,等.基于HYDRUS-2D的滨海地区膜下滴灌土壤水盐运移模拟研究[J].干旱地区农业研究,2020,38(5):182-191.
[20] 王荣荣.景电灌区土壤盐渍化特征及水盐运移规律研究[D].郑州:华北水利水电大学,2017.
[21] 潘延鑫,罗纨,贾忠华,等.基于HYDRUS模型的盐碱地土壤水盐运移模拟[J].干旱地区农业研究,2017,35(1):135-142.
[22] 史海滨,杨树青,李瑞平,等.内蒙古河套灌区水盐运动与盐渍化防治研究展望[J].灌溉排水学报,2020,39(8):1-17.
[23] 程慧.景电灌区不同灌溉方式下水盐运移规律研究[D].郑州:华北水利水电大学,2018.
[24] 杨洪涛,王小兵.工程教育专业认证标准下的测控专业实践教学的改革与实践[J].实验技术与管理,2017,34(6):183-186.
[25] 李鹏,王延霞,邓岳川,等.基于OBE理念的导航工程专业工程认证教育课程体系构建[J].榆林学院学报,2021,31(4):74-78+89.
[26] 张千帆,段林彤.新工科背景下教学改革与创新:以量子力学教学为例[J].河北师范大学学报(教育科学版),2021,23(2):135-140.
[27] PARHI P K,MISHRA S K,SINGH R. A modification to Kostiakov and modified Kostiakov infiltration models[J]. Water Resources Management,2007,21:1973-1989.
[28] WIFRIED B.水文学导论[M].王忠静,梁友,耿国婷,等,译.北京:气象出版社,2017:205.

(责任编辑:李拓宇)