

咸淡水组合灌溉下鲁北盐碱土壤水盐分布及脱盐特征

王乃江¹, 李嘉怡², 武华宝¹, 王伟臣¹, 高佩玲³, 刘璐¹

(1. 山东农业工程学院 国土资源与测绘工程学院, 济南 250100;

2. 潍坊学院 现代农学院, 山东 潍坊 261061; 3. 山东理工大学 资源与环境工程学院, 山东 淄博 255000)

摘要: [目的] 揭示微咸水淡化灌溉对盐碱土壤水盐的调控效果, 为鲁北地区破解农业淡水资源短缺与土壤盐碱化问题提供安全的微咸水灌溉方案。[方法] 以取自垦利区的重度盐碱化土壤为对象, 借助室内土柱模拟试验与一维代数模型, 探究不同咸淡水组合比例(全部淡水和微咸水灌溉以及咸:淡=1:2, 1:1, 2:1)和次序(先咸后淡和先淡后咸)下土壤水盐分布及脱盐特征。[结果] 随着咸淡水组合比例的提高, 同一土层的土壤含水率先升高后降低, 其中在 5—15 cm 土层, 咸:淡=1:2 的土壤含水率最高, 在 15—55 cm 土层, 咸:淡=2:1 的土壤含水率最高。相较于先淡后咸, 先咸后淡提高了土壤含水率。对于土壤水分垂直分布, 一维代数模型模拟效果“极好”, 标准化均方根误差小于 10%, 一致性指数大于 0.9。在 5—35 cm, 5—25 cm 和 5—15 cm 土层, 咸:淡=1:2, 1:1, 2:1 的土壤含盐量分别小于全部微咸水灌溉, 与全部淡水灌溉一致。所以在一定土层内, 咸淡水组合灌溉产生了与全部淡水灌溉相同的脱盐作用, 尤其当咸:淡=1:2 时, 达标土壤脱盐深度与全部淡水灌溉下的情况差异不显著。先咸后淡对浅层(5—10 cm)的脱盐效果更明显, 而先淡后咸对深层(40—45 cm)的脱盐效果更明显。[结论] 综合考虑不同咸淡水组合比例和次序的影响, 建议选择 1:2 的咸淡水组合比例和先咸后淡的咸淡水组合次序。

关键词: 盐碱土壤; 咸淡水组合灌溉; 模拟试验; 土壤水盐分布; 土壤脱盐

中图分类号: S156.4⁺6

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)03-0257-09

Water-salt distribution and desalination characteristics of saline-alkali soils under combined irrigation of brackish-fresh water in Northern Shandong

Wang Naijiang¹, Li Jiayi², Wu Huabao¹, Wang Weichen¹, Gao Peiling³, Liu Lu¹

(1. College of Land Resources and Surveying & Mapping Engineering, Shandong Agriculture and Engineering University, Jinan 250100, China; 2. School of Advanced Agricultural Sciences, Weifang University, Weifang, Shandong 261061, China; 3. School of Resources and Environmental Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255000, China)

Abstract: [Objective] This study aims to reveal the regulatory effects of diluted brackish water irrigation on water and salt dynamics in saline-alkali soil in Northern Shandong and to provide a safe irrigation scheme to alleviate agricultural freshwater shortage and soil salinization-alkalization. [Methods] Severely saline-alkali soils collected from the Kenli District were used in this study. Laboratory-based soil column simulation experiments and a one-dimensional algebraic model were used to investigate soil water-salt distribution and desalination characteristics under different combination ratios and irrigation sequences of brackish and fresh water. The five combination ratios were: all fresh water, all brackish water, and brackish-to-fresh water ratios of 1:2, 1:1, and 2:1. Two sequences were: brackish water irrigated before fresh water and fresh water irrigated before brackish water. [Results] As the combination ratio of brackish-to-fresh water increased, the soil water content in the same soil layer initially increased and then decreased. The highest soil water content was observed in the 5—15 cm layers under the

收稿日期: 2025-05-30

修回日期: 2025-07-03

接受日期: 2025-07-25

资助项目: 山东省自然科学基金资助项目(ZR2025QC543); 山东农业工程学院高层次人才科研启动经费资助项目(2024GCCZR-09); 山东省大学生创新创业训练计划项目(S202411067040)

第一作者: 王乃江(1990—), 男, 山东菏泽人, 博士, 讲师, 研究方向为农业水土资源利用与保护。E-mail: 1181613832@qq.com

通信作者: 刘璐(1992—), 女, 山东潍坊人, 博士, 讲师, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: luliull1020@126.com

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

brackish-to-fresh water ratio of 1:2 and 15—55 cm layers under the ratio of 2:1. Compared with the fresh water-first sequence, applying brackish water before fresh water resulted in higher soil water content. The one-dimensional algebraic model performed excellently in simulating vertical soil water distribution, with a normalized root mean square error <10% and an index of agreement >0.9. Soil salt content under the 1:2, 1:1, and 2:1 brackish-to-fresh water ratios, was lower than that under brackish water irrigation alone, and was consistent with that under fresh water irrigation alone in soil layers of 5—35 cm, 5—25 cm, and 5—15 cm, respectively. Therefore, combined irrigation of brackish and fresh water produced the same desalination effect as using only fresh water in certain soil layers, especially under the 1:2 brackish-to-fresh water ratio, where the effective desalination depth showed no significant difference from that produced by fresh water irrigation alone. Applying brackish water before fresh water was more effective for soil desalination in shallow soil layers (5—10 cm), whereas the fresh water-first sequence was more effective in deep soil layers (40—45 cm). [Conclusion] Considering both combination ratios and irrigation sequences, a brackish-to-fresh water ratio of 1:2 combined with the irrigation sequence of brackish water first and then fresh water is recommended.

Keywords: saline-alkali soil; combined irrigation of brackish and fresh water; simulation experiment; soil water-salt distribution; soil desalination

鲁北位于山东省北部,总面积 3.7 万 km²(包括东营市、滨州市、德州市和聊城市),是重要的粮棉油生产基地,也是主要的农业灌溉区域。目前,该区域农业淡水资源不足,农业水土资源匹配系数仅为 28.1 万 m³/km²,约为全国平均水平的 1/2^[1],严重阻碍了灌溉农业的可持续发展。据探测,鲁北地下微咸水储量丰富(比如在东营市,矿化度为 2~5 g/L 的微咸水多年平均储量达 3.1 亿 m³^[2]),为缓解该区域农业灌溉用水缺乏提供了一种有效的水源。

但是,鲁北土壤盐碱化问题严重,盐碱农田面积达 2 909 km²^[3]。在盐碱地上进行微咸水灌溉,不可避免地会向土壤中投入新的盐离子,长期如此,可能会造成某一土层或整个土壤剖面的盐分含量升高,加重土壤盐碱化^[4-6]。为此,前人提出了咸淡水混合灌溉这一模式,也就是利用淡水将微咸水淡化后,再进行农业灌溉^[6]。大量的学者发现,相较于微咸水直接灌溉,咸淡水混合灌溉在减少土壤盐分(一定深度内)方面优势明显,但同时也发现,微咸水无论被淡水淡化到何种水平,仍含有一定浓度的盐离子,其灌溉下盐碱土壤脱盐程度劣于淡水灌溉。比如,王育强等^[7]的土柱模拟试验结果表明,在两种质地(粉砂质壤土和黏壤土)的重度盐碱地上,咸淡水混合灌

溉下盐离子(Na⁺, Cl⁻等)含量高于淡水灌溉,导致土壤脱盐率分别降低了 36.6% 和 49.6%。相似的结果亦被 Feng 等^[8-9]、Li 等^[10]和王广恩等^[11]报道。所以,鲁北地区需要寻求一种更加安全的利用淡水使微咸水淡化的模式,在节约农业淡水资源的前提下提高微咸水灌溉淋洗盐碱土壤盐分的作用。

基于此,本研究创新性地在这次灌溉中,没有将两份水源(微咸水和淡水)进行混合灌溉,而是按照一定的次序,先后进行微咸水和淡水灌溉(本文将此种微咸水淡化灌溉模式称为咸淡水组合灌溉),探究盐碱土壤水盐分布及脱盐特征,为在鲁北盐碱地上进行合理的微咸水灌溉提供科学理论依据和实践应用方案。

1 材料与方法

1.1 试验材料与装置

供试土壤取自山东省东营市垦利区郝家镇吴杨村的盐碱农田,取样深度为 0—60 cm。取回后,室内经过风干、碾压、过筛、混合等一系列操作,制备成均一土样(取部分土样,测定土壤机械组成和水盐含量)。同时采集原状土,室内测定田间持水率、饱和含水率和容重(表 1)。试验土样为重度盐碱化土壤。

表 1 供试土壤的主要理化性质

Table 1 Main physicochemical properties of experimental soils

土壤机械组成/%			风干土样 含水率/%	电导率/ (mS·cm ⁻¹)	含盐量/ (g·kg ⁻¹)	田间持水率/ %	饱和含水率/ %	容重/ (g·cm ⁻³)
砂粒	粉粒	黏粒						
75.70	21.53	2.78	1.00	0.97	4.10	27.85	33.63	1.41

试验用水包括淡水和微咸水,土壤计划湿润层深度设置为 60 cm,一次试验的灌水定额为^[12]:

$$M = (\theta_{\max} - \theta_0) \gamma H \quad (1)$$

式中: M 为灌水定额(cm); θ_{\max} 为灌溉后土壤所允许

的最大含水率(田间持水率,27.85%); θ_0 为土壤初始含水率(1.00%); γ 为土壤容重(1.41 g/cm³); H 为土壤计划湿润层深度(60 cm)。计算得到灌水定额为22.71 cm。试验所用的淡水为蒸馏水,微咸水是利用化学试剂配制而成(矿化度为3 g/L)。

试验装置主要由土柱(高90 cm,内直径8 cm)和马氏瓶(高50 cm,内直径8 cm)组成(图1)。土柱和马氏瓶均由厚为0.5 cm的有机玻璃制作而成。土柱顶部10 cm以下,两侧每隔5 cm设置圆形取样口,直径为1.5 cm。利用马氏瓶供水,通过改变控制台高度,使供水水头保持在2 cm左右。

1.2 试验设计与方法

本研究的咸淡水组合灌溉是指在一次灌溉中,一定比例的两份水源(微咸水和淡水,总量等于灌水定额)按照一定的次序依次进行灌溉。所以,咸淡水组合比例和次序是咸淡水组合灌溉需要确定的两个指标。在咸淡水组合次序(先咸后淡)不变的情况

下,设置5种咸淡水组合比例(全部淡水和微咸水灌溉以及咸:淡=1:2,1:1,2:1);在咸淡水组合比例(咸:淡=1:2)不变的情况下,设置了2种咸淡水组合次序(先咸后淡和先淡后咸),共7个处理,每个处理3个重复,具体的试验方案见表2。

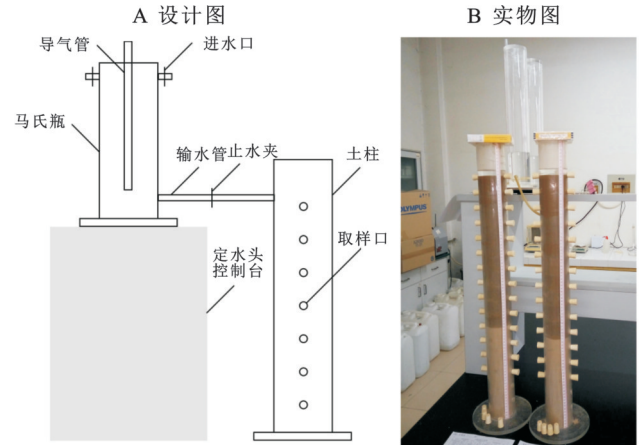


图 1 试验装置

Fig. 1 Experimental device

表 2 咸淡水组合灌溉试验方案

Table 2 Experimental schemes of combined irrigation of brackish and fresh water

处理	微咸水灌水量占灌水定额的比例/%	微咸水灌水量/cm	淡水灌水量/cm
全部淡水灌溉	0	0	22.71
咸淡水组合比例	咸:淡=1:2	7.57	15.14
	咸:淡=1:1	11.355	11.355
	咸:淡=2:1	15.14	7.57
	全部微咸水灌溉	100	22.71
咸淡水组合次序	先咸后淡	7.57	15.14
	先淡后咸	7.57	15.14

土柱装土高度80 cm,分16层填装,每层装土质量根据下式计算:

$$m = h\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2 \gamma(1 + \theta_0) \quad (2)$$

式中: m 为每层土样质量(g); h 为每层土样高度(5 cm); d 为土柱内直径(8 cm); γ 为土样设计容重(1.41 g/cm³); θ_0 为土样初始含水率(1.00%)。计算得到每层装土质量为357.92 g。试验过程中,记录累积入渗量和湿润锋深度的动态变化。入渗结束后,从取样口采集土样,测定土壤含水率和电导率(3次重复)^[13],并且将测得的土壤电导率转化为含盐量^[14]:

$$S = 4EC + 0.237 \quad (3)$$

式中: S 为土壤含盐量(g/kg); EC 为土壤电导率(mS/cm)。

1.3 一维代数模型

为了定量刻画土壤水分垂直分布特征,本研究利用Wang等^[15]提出的一维代数模型开展模拟工作:

$$\theta = \left(1 - \frac{z}{z_f}\right)^\alpha (\theta_s - \theta_r) + \theta_r \quad (4)$$

式中: θ 为不同深度的土壤含水率(cm³/cm³); z 为距离土表的深度(cm); z_f 为灌溉结束时的湿润锋深度(cm); α 为土壤水分特征曲线和非饱和导水率综合形状系数; θ_s 为土壤饱和含水率(cm³/cm³); θ_r 为土壤滞留含水率(cm³/cm³)。其中, α 可以根据土壤水分入渗过程中累积入渗量与湿润锋深度之间的回归系数推算:

$$I = \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + \alpha} Z_f + (\theta_r - \theta_0) Z_f \quad (5)$$

式中: I 为不同入渗时刻的累积入渗量(cm); Z_f 为不同入渗时刻的湿润锋深度(cm); θ_0 为土壤初始含水率(cm³/cm³)。

由于试验土样初始含水率很低,假设 $\theta_r = \theta_0$,故上述公式转化为:

$$\theta = \left(1 - \frac{z}{z_f}\right)^\alpha (\theta_s - \theta_0) + \theta_0 \quad (6)$$

$$I = \frac{\theta_s - \theta_0}{1 + \alpha} Z_f \quad (7)$$

为了便于与实测的土壤含水率对比,将模拟的土壤体积含水率(cm^3/cm^3)转化为质量含水率(%)。利用标准化均方根误差和一致性指数评估一维代数模型对土壤含水率的模拟精度:

$$\text{nRMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n}} \times \frac{100}{\bar{O}} \quad (8)$$

$$\text{IA} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (9)$$

式中:nRMSE为标准化均方根误差(%);IA为一致性指数; S_i 为土壤含水率模拟值(%); O_i 和 \bar{O} 分别为土壤含水率实测值(%)及其平均值(%); n 为样本数。nRMSE $<10\%$,表明模拟效果“极好”; $10\% \leq \text{nRMSE} < 20\%$,表明模拟效果“较好”; $20\% \leq \text{nRMSE} < 30\%$,表明模拟效果“一般”;nRMSE $\geq 30\%$,表明模拟效果“差”^[16]。IA ≥ 0.9 ,表明模拟效果“极好”; $0.8 \leq \text{IA} < 0.9$,表明模拟效果“较好”; $0.7 \leq \text{IA} < 0.8$,表明模拟效果“一般”;IA < 0.7 ,表明模拟效果“差”^[17]。

1.4 土壤脱盐表征

本研究利用土壤盐分变化量、土壤脱盐深度和达标土壤脱盐深度3个指标表征土壤脱盐状况。其中,土壤盐分变化量为灌溉后与灌溉前的土壤含盐量之差,负值代表土壤脱盐,正值代表土壤积盐。土壤脱盐深度和达标土壤脱盐深度分别为灌溉后土壤含盐量低于初始水平和冲洗脱盐标准的垂直深度。由于作物苗期耐盐性最小,冲洗脱盐标准一般以作物苗期要求的土壤含盐量为根据^[18]。本研究选择棉

花、冬小麦、夏玉米和大豆(播种面积超过鲁北地区农作物总播种面积的85%)为对象,其苗期的耐盐度分别为2.5~3.5 g/kg,2.2~3.0 g/kg,2.0~2.5 g/kg和1.8 g/kg^[12]。为了更加严格地评估咸淡水组合灌溉的风险,以作物苗期耐盐度的下限为冲洗脱盐标准。

1.5 数据处理

文中数据为3次重复的平均值。在SPSS 23.0软件中对数据进行单因素方差分析和回归分析,显著性水平设置为0.05。采用SigmaPlot 12.5软件绘制图件。

2 结果与分析

2.1 土壤水分垂直分布特征

在5—55 cm土层,随着咸淡水组合比例的提高,土壤含水率基本上先升高后降低,其中全部淡水灌溉下土壤含水率最低(图2A)。造成上述结果的原因是随着土壤盐分离子的增多,扩散双电子层向黏粒表面压缩,土壤颗粒之间的排斥力降低,土壤胶体的絮凝增强,从而促进了土壤孔隙的发育^[19],使得土壤含水率增加。但当微咸水灌水量进一步增加时,进入土壤中的 Na^+ 也随之增加, Na^+ 电荷少,半径大,水化能小,造成土壤颗粒膨胀和分散,导致土壤孔隙损失^[20],从而降低了土壤含水率。由于不同咸淡水组合比例下土壤盐离子垂直分布的变异性,在5—15 cm土层,咸淡比为1:2的土壤含水率最大,而在15—55 cm土层,咸淡比为2:1的土壤含水率最大。

由图2B可知,先咸后淡下不同深度的土壤含水率基本上均大于先淡后咸。这一方面是因为首轮微咸水灌溉对土壤孔隙的积极作用强于次轮微咸水灌溉^[21],为土壤贮水提供了更多有效的空间,另一方面是因为先淡后咸的入渗时间(3 543 min)远远长于先咸后淡(1 539 min),造成更多的土壤水分向深层渗漏。

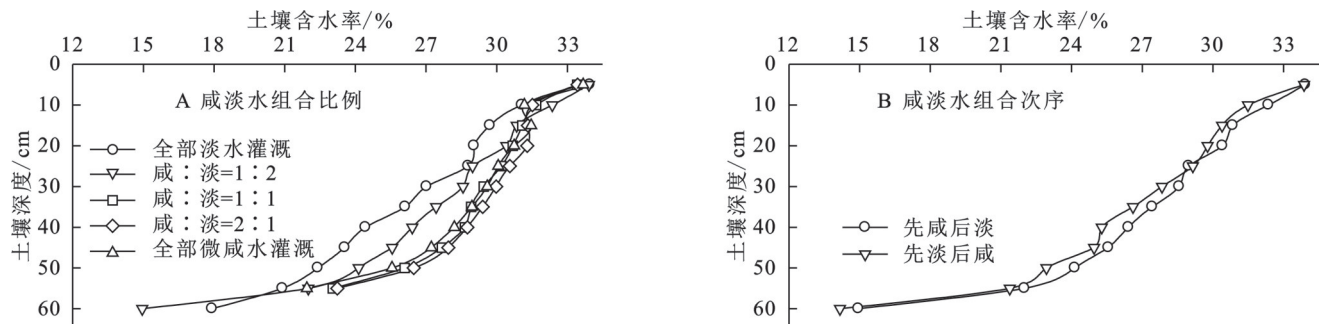


图2 咸淡水组合灌溉下土壤水分垂直分布特征

Fig. 2 Vertical distribution characteristics of soil water under combined irrigation of brackish and fresh water

2.2 土壤水分垂直分布特征模拟

通过原点的线性方程可以准确地描述土壤水分入渗过程中累积入渗量 I 与湿润锋深度 Z_f 之间的数学关系($p < 0.01$)(图3)。基于回归系数求得的综合

形状系数 α 发现,综合形状系数 α 与微咸水灌水量所占灌水定额的比例成反比,先咸后淡的综合形状系数 α 小于先淡后咸。

将推算的综合形状系数 α 与其他参数代入公式

(6)计算得到,不同咸淡水组合比例下一维代数模型模拟土壤含水率的效果存在一定的不同(图4)。但是,不同咸淡水组合次序之间的差异较小,先咸后淡与先淡后咸下土壤含水率的模拟值均大致分布在实测值的周围。所以,影响一维代数模型模拟效果的主要因素是

咸淡水组合比例,而非咸淡水组合次序。从评价指标上看,所有处理的标准化均方根误差nRMSE(3.8%~6.7%)均小于10%,一致性指数IA(0.92~0.99)均大于0.90,表明一维代数模型可以“极好”地模拟咸淡水组合灌溉下不同深度的土壤含水率。

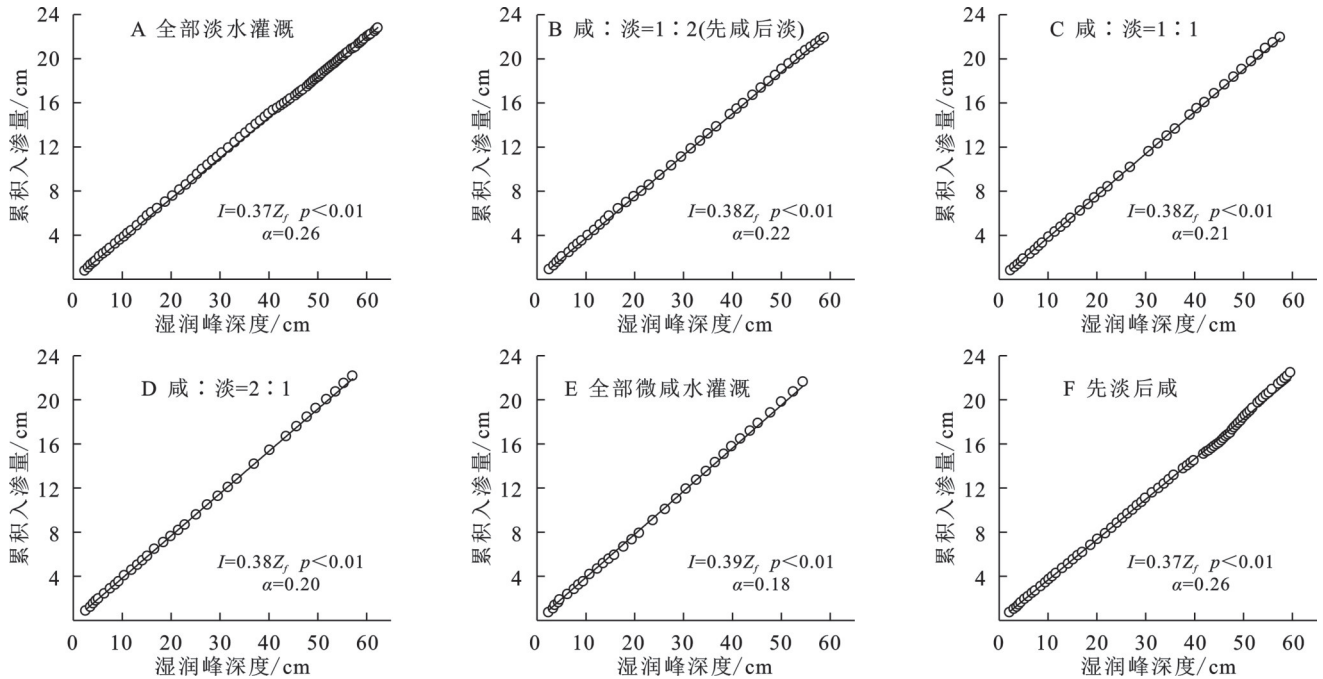


图3 咸淡水组合灌溉下综合形状系数

Fig. 3 Comprehensive shape coefficients under combined irrigation of brackish and fresh water

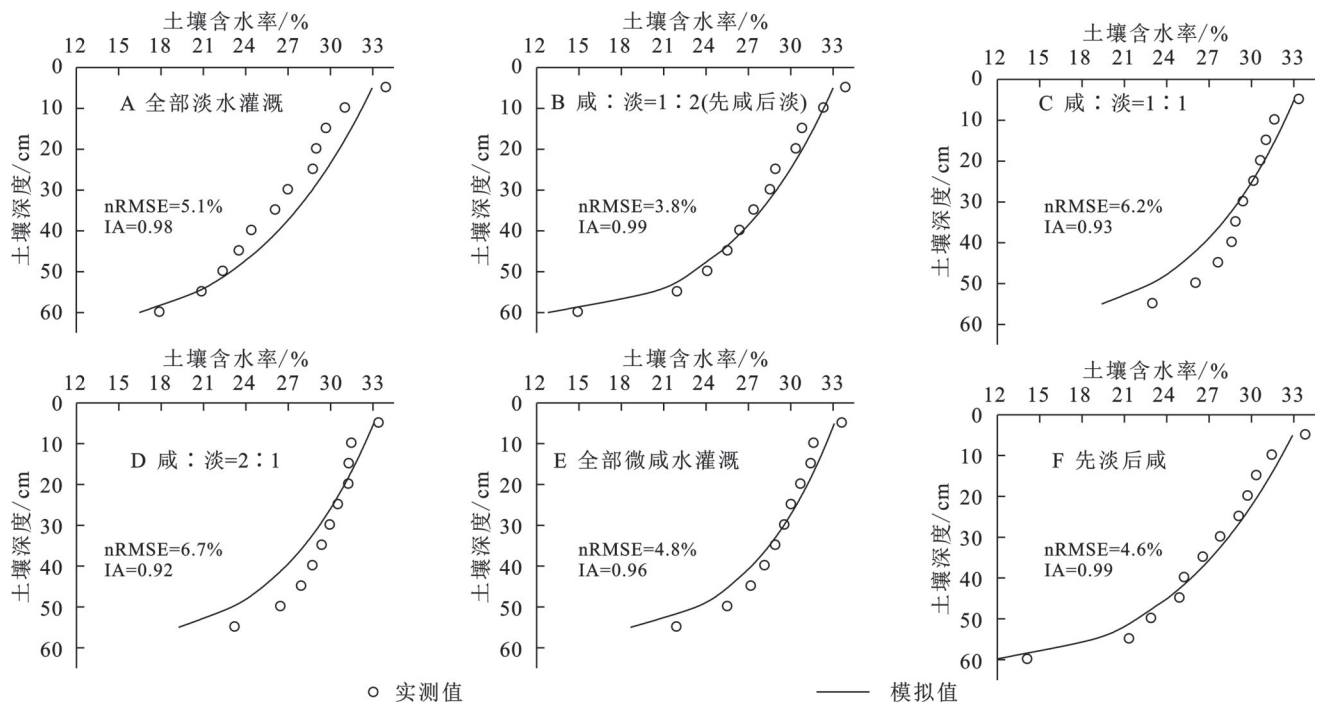


图4 咸淡水组合灌溉下土壤含水率模拟值与实测值

Fig. 4 Simulated and observed soil water contents under combined irrigation of brackish and fresh water

2.3 土壤盐分垂直分布特征

由图5A可知,在5—35 cm,5—25 cm和5—15 cm土层,咸淡比为1:2,1:1,2:1的土壤含盐量分别

低于全部微咸水灌溉,与全部淡水灌溉差异较小。随着深度的增加,咸淡比为1:2的土壤含盐量不断增加,而咸淡比为1:1,2:1的土壤含盐量先增加后不变

再急剧增加,在此过程中,3个处理的土壤含盐量均高于全部淡水灌溉。上述结果说明,次轮淡水灌溉能够有效淋洗首轮微咸水灌溉带入土壤中的盐分,但这种作用具有一定的限度,当超过某一深度时,次轮淡水的淋洗效果会减弱,甚至消失。

土层越深,先咸后淡的土壤含盐量越高,而先淡后咸的土壤含盐量呈先降低后升高的变化(图 5B)。

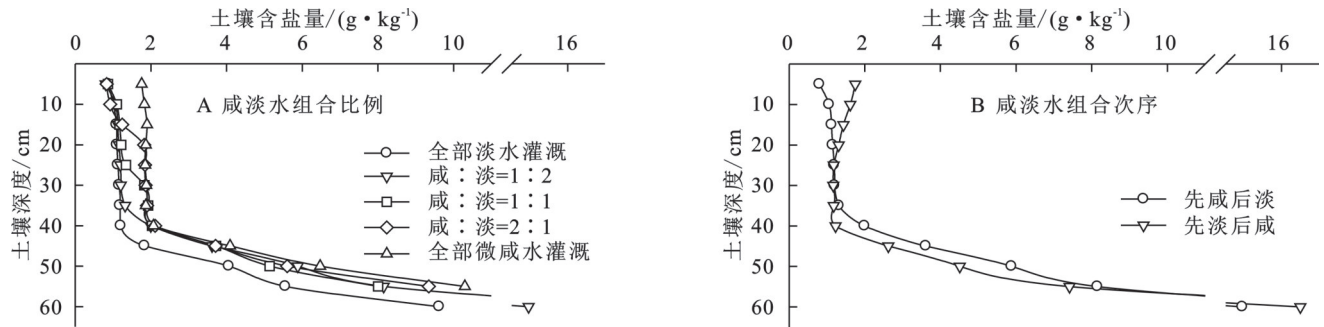


图 5 咸淡水组合灌溉下土壤盐分垂直分布特征

Fig. 5 Vertical distribution characteristics of soil salt under combined irrigation of brackish and fresh water

2.4 土壤脱盐特征

表 3 显示,不同咸淡水组合比例和次序下土壤出现中上层脱盐(盐分变化量小于零)、下层积盐(盐分变化量大于零)的现象。当深度小于等于 35 cm, 25 cm 和 15 cm 时,咸淡比为 1:2, 1:1, 2:1 的土壤脱盐量分别为 3.0 g/kg, 3.0 g/kg 和 3.1 g/kg(平均值),显著高于全部微咸水灌溉,与全部淡水灌溉的差异不显著。但是,当超过上述深度时,咸淡比为 1:2, 1:1, 2:1

在 5—25 cm 土层和湿润峰附近,先淡后咸的土壤含盐量高于先咸后淡,但在 25—55 cm 土层,规律完全相反,这是因为首轮淡水灌溉结束时,入渗达到稳定状态,入渗率较小,导致第二轮灌溉的微咸水集中在土壤上层,而入渗稍早的淡水将更多的土壤盐分淋洗至湿润锋附近。所以,先咸后淡更有利于降低上层土壤含盐量,而先淡后咸更有利于降低中下层土壤含盐量。

的土壤脱盐量显著低于全部淡水灌溉,与全部微咸水灌溉一致。由此可知,咸淡水组合灌溉可以在一定深度内达到与全部淡水灌溉一样的脱盐效果,这一深度随着咸淡水组合比例的提高而降低。在 5—10 cm 土层,先咸后淡的土壤脱盐量显著高于先淡后咸,而在 40—45 cm 土层,先淡后咸的土壤脱盐量显著高于先咸后淡,这说明先咸后淡在浅层的脱盐效果更佳,而先淡后咸在深层的脱盐效果更佳。

表 3 咸淡水组合灌溉下土壤盐分变化量

Table 3 Changes in soil salt under combined irrigation of brackish and fresh water

处理	不同深度土壤盐分变化量/(g·kg ⁻¹)												
	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm	35 cm	40 cm	45 cm	50 cm	55 cm	60 cm	
咸淡水 组合比例	全部淡水灌溉	-3.2b	-3.1b	-3.0b	-3.0b	-3.0b	-2.9b	-2.9b	-2.9b	-2.3b	0.0d	1.5d	5.5b
	咸:淡=1:2	-3.3b	-3.0b	-3.0b	-2.9b	-2.9b	-2.9b	-2.8b	-2.1a	-0.5a	1.8b	4.1c	10.9a
	咸:淡=1:1	-3.2b	-3.0b	-2.9b	-2.9b	-2.8b	-2.3a	-2.2a	-2.1a	-0.4a	1.0c	3.9c	—
	咸:淡=2:1	-3.3b	-3.2b	-2.9b	-2.3a	-2.3a	-2.2a	-2.2a	-2.0a	-0.4a	1.5bc	5.2b	—
全部微咸水灌溉	-2.3a	-2.3a	-2.2a	-2.2a	-2.3a	-2.2a	-2.2a	-2.0a	0.0a	2.4a	6.2a	—	
咸淡水 组合次序	先咸后淡	-3.3B	-3.0B	-3.0A	-2.9A	-2.9A	-2.9A	-2.8A	-2.1A	-0.5A	1.8A	4.1A	10.9B
	先淡后咸	-2.4A	-2.5A	-2.7A	-2.8A	-2.9A	-2.9A	-2.9A	-2.9B	-1.5B	0.4B	3.3B	12.4A

注:同列数据后的不同小写字母或大写字母表示处理间的土壤盐分变化量在 0.05 水平上存在显著差异;“—”代表土壤水分未入渗到此深度,未计算土壤盐分变化量。

各处理的土壤脱盐深度在 47.0 cm 左右,之间不存在显著性差异(表 4)。关于达标土壤脱盐深度,由表 4 可知,对于棉花和冬小麦,不同咸淡水组合比例的效果一致,而对于夏玉米和大豆,不同咸淡水组合比例产生了不同的影响。全部淡水灌溉下夏玉米和大豆的达标土壤脱盐深度最大,显著高于咸:淡=1:1, 2:1 以及全部微咸水灌溉,但与咸:淡=1:2 没有显著性差异。无论是棉花和冬小麦,还是夏玉

米和大豆,其达标脱盐深度对咸淡水组合次序的响应均不显著。所以,对于咸淡水组合灌溉,只要选择合适的咸淡水组合比例,可以使作物免受土壤盐分的胁迫。

3 讨论

与淡水相比,微咸水中存在一定数量的盐分,进入土壤后,影响土壤团聚和分散,进而影响土壤水盐

运动^[6]。同时,天然土体是不均一的,局部可能存在夹层、虫洞、裂隙等,此种不均一性也会对土壤水盐运动产生非常大的影响^[19]。为了准确得到不同咸淡

水组合比例和次序下盐碱土壤水盐分布及脱盐特征,本试验采用的土样为经过处理后的均一扰动土,而没有直接采用天然的原状土。

表4 咸淡水组合灌溉下土壤脱盐深度

Table 4 Soil desalination depths under combined irrigation of brackish and fresh water

处理	土壤脱盐深度/cm	达标土壤脱盐深度/cm				
		棉花	冬小麦	夏玉米	大豆	
咸淡水组合比例	全部淡水灌溉	50.1a	46.5a	45.8a	45.4a	44.7a
	咸:淡=1:2	46.1a	41.6a	40.6a	40.0ab	38.6a
	咸:淡=1:1	46.3a	41.4a	40.5a	38.7b	29.7b
	咸:淡=2:1	46.0a	41.2a	40.3a	37.5b	19.8c
	全部微咸水灌溉	45.0a	41.1a	40.3a	38.4b	8.1d
咸淡水组合次序	先咸后淡	46.1A	41.6A	40.6A	40.0A	38.6A
	先淡后咸	48.9A	44.6A	43.5A	42.8A	42.0A

注:同列数据后的不同小写字母或大写字母表示处理间的土壤脱盐深度或达标土壤脱盐深度在0.05水平上存在显著差异。

微咸水灌溉下土壤水分垂直分布特征一般与入渗水矿化度和钠吸附比有关,即进入土壤中的盐分总量和 Na^+ 数量共同影响土壤贮水能力^[19-20]。当进入土壤中的盐分总量较少时,其与土壤贮水能力呈正相关关系,当超过某一阈值时,进入土壤中的 Na^+ 数量对土壤贮水能力起决定作用,即 Na^+ 数量越多,土壤贮水能力越弱^[22]。所以,当微咸水灌溉水量增加(盐分总量和 Na^+ 数量同时增加)时,某一深度的土壤含水率并非一直增加,而是呈先增加后减少的变化规律。本研究也得到相似的结果,但在不同的土层,最佳的咸淡水组合比例不同:在5—15 cm土层,咸:淡=1:2的土壤贮水效果最佳;在15—55 cm土层,咸:淡=2:1的土壤贮水效果最佳(图2)。所以,咸:淡=1:2创造了更加湿润的耕层环境,而咸:淡=2:1的作用主要在耕层之下。对于咸淡水组合灌溉,除了组合比例,组合次序对土壤贮水能力亦存在较大的影响。相较于先淡后咸,先咸后淡使不同深度的土壤含水率均得到了提高。由此可知,在相同的灌水定额下,先咸后淡的组合次序更有益于改善土壤水分垂直分布,使更多的灌溉水贮存在土壤有效深度内,减少深层渗漏。

目前,灌溉洗盐是减少盐碱地土壤盐分最直接有效的方法^[23]。大量研究表明,在盐碱地上灌溉微咸水或淡化后的微咸水,土壤水分的下行运动能够带走一部分土壤固有的盐分,但微咸水本身含有盐离子,其灌溉又向土壤中投入新的盐分,所以土壤脱盐效果不如淡水灌溉,甚至可能导致土壤积盐^[8-11,24-26]。上述情况在咸淡水组合灌溉下可以得到一定的缓解,灌水定额中微咸水灌溉水量越少,土壤脱盐量越多(表3)。当咸:淡=1:2时,鲁北地区主要农作物(棉花、冬小麦、夏玉米和大豆)的达标土壤脱盐

深度与全部淡水灌溉不存在显著性差异(表4),这在一定程度上说明咸:淡=1:2创造了与全部淡水灌溉相同的作物根系生长盐环境。尽管不同咸淡水组合次序下土壤脱盐量(平均值)、土壤脱盐深度和达标土壤脱盐深度基本一致,但咸淡水组合次序会影响不同土层的脱盐情况。其中,先咸后淡对浅层(5—10 cm)的脱盐作用更明显,而先淡后咸对深层(40—45 cm)的脱盐作用更明显。田间试验发现,耕层作为作物根系分布最密集的区域,降低其含盐量在提升盐碱农田产能方面具有重要作用^[27]。所以,本研究推测,相较于先淡后咸,先咸后淡的土壤脱盐特征更有利于作物的生长发育,进而保证作物的产量水平。

综合考虑不同咸淡水组合比例和次序的影响,本研究建议咸淡水组合比例选择1:2,咸淡水组合次序选择先咸后淡。但是,本研究的结果是基于室内土柱模拟试验得到的,土壤、气象等条件是恒定不变的,田间试验有待进一步验证。

4 结论

(1) 咸淡水组合灌溉提高了土壤贮水能力。随着灌水定额中微咸水灌溉水量的增多,同一深度的土壤含水率先升高后降低。相较于先淡后咸,先咸后淡下土壤含水率更高。对于土壤水分垂直分布特征,一维代数模型可以“极好”地描述。

(2) 咸淡水组合灌溉有效淋洗了土壤盐分。在一定土层内,咸淡水组合灌溉产生了与全部淡水灌溉一样的脱盐效果,咸淡水组合比例越小,该深度越大,尤其当咸:淡=1:2时,达标土壤脱盐深度与全部淡水灌溉一致。先咸后淡在浅层的脱盐效果更佳,而先淡后咸在深层的脱盐效果更佳。

(3)为了更好地改善盐碱土壤的水盐环境,建议咸淡水组合比例和次序分别为1:2和先咸后淡,但其田间效果需要进一步验证。

参考文献(References):

- [1] 李晓燕,郝晋珉,陈爱琪.山东省农业水土资源时空匹配格局及评价研究[J].中国农业大学学报,2020,25(11):1-11.
Li X Y, Hao J M, Chen A Q. Time-space matching pattern and evaluation of agricultural water and soil resources in Shandong Province [J]. Journal of China Agricultural University, 2020,25(11):1-11.
- [2] 李恩辉,燕美英,张兴凤.东营市引黄灌区微咸水灌溉应用技术探索[J].山西水利科技,2024(3):63-66.
Li E H, Yan M Y, Zhang X F. Application technology of brackish water irrigation in the Yellow River diversion irrigation area of Dongying City [J]. Shanxi Hydrotechnics, 2024(3):63-66.
- [3] 董红云,朱振林,李新华,等.山东省盐碱地分布、改良利用现状与治理成效潜力分析[J].山东农业科学,2017,49(5):134-139.
Dong H Y, Zhu Z L, Li X H, et al. Analysis on distribution, utilization status and governance effect of saline-alkali soil in Shandong Province [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2017,49(5):134-139.
- [4] Wang H, Zheng C L, Ning S R, et al. Impacts of long-term saline water irrigation on soil properties and crop yields under maize-wheat crop rotation [J]. Agricultural Water Management, 2023,286:108383.
- [5] 孙宏勇,刘小京,张喜英.盐碱地水盐调控研究[J].中国生态农业学报,2018,26(10):1528-1536.
Sun H Y, Liu X J, Zhang X Y. Regulations of salt and water of saline-alkali soil: a review [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018,26(10):1528-1536.
- [6] 倪刚,贺晨,曾溢,等.盐碱地咸水/微咸水农业安全与高效利用研究进展与展望[J].灌溉排水学报,2023,42(12):149-156.
Ni G, He C, Zeng Y, et al. Safe and efficient utilization of saline and brackish water in saline-alkali farmland: progress and perspective [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023,42(12):149-156.
- [7] 王育强,管瑶,贺兴宏,等.淋洗灌溉模式对不同质地盐碱土水盐运移的影响研究[J].干旱区资源与环境,2023,37(7):137-145.
Wang Y Q, Guan Y, He X H, et al. Effects of leaching irrigation patterns on water and salt transport in saline-alkali soil with different textures [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023,37(7):137-145.
- [8] Feng D, Ning S R, Sun X A, et al. Agricultural use of deserted saline land through an optimized drip irrigation system with mild salinized water [J]. Agricultural Water Management, 2023,281:108261.
- [9] Feng D, Sun C T, Li X B, et al. Reclamation of heavy coastal silt saline soil and optimal tomato production through a drip irrigation system with saline water [J]. Plant and Soil, 2023,484(1):407-423.
- [10] Li J S, Gao Y M, Zhang X Y, et al. Comprehensive comparison of different saline water irrigation strategies for tomato production: soil properties, plant growth, fruit yield and fruit quality [J]. Agricultural Water Management, 2019,213:521-533.
- [11] 王广恩,郭丽,钱玉源,等.不同咸水利用方式对棉花叶绿素荧光参数及土壤盐分的影响[J].棉花学报,2021,33(1):13-21.
Wang G E, Guo L, Qian Y Y, et al. Effects of different saline water irrigation on chlorophyll fluorescence parameters in cotton and the soil salt content [J]. Cotton Science, 2021,33(1):13-21.
- [12] 康绍忠.农业水利学[M].北京:中国水利水电出版社,2023.
Kang S Z. Agricultural water conservancy discipline [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2023.
- [13] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [14] 王卓然,赵庚星,高明秀,等.黄河三角洲典型地区春季土壤水盐空间分异特征研究:以垦利县为例[J].农业资源与环境学报,2015,32(2):154-161.
Wang Z R, Zhao G X, Gao M X, et al. Characteristics of soil water and salt spatial variations in the spring season in typical Yellow River Delta areas of Kenli County, China [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2015,32(2):154-161.
- [15] Wang Q J, Horton R, Shao M A. Algebraic model for one-dimensional infiltration and soil water distribution [J]. Soil Science, 2003,168(10):671-676.
- [16] 林延荣,刘朋召,郭星宇,等.平水年和欠水年渭北旱地冬小麦临界氮浓度稀释曲线构建[J].农业工程学报,2023,39(21):120-129.
Lin Y R, Liu P Z, Guo X Y, et al. Establishment of critical nitrogen concentration dilution curves for winter wheat in Weibei dryland under normal and dry years [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023,39(21):120-129.
- [17] Liu S, Yang J Y, Zhang X Y, et al. Modelling crop yield, soil water content and soil temperature for a soybean-maize rotation under conventional and conservation tillage systems in Northeast China [J]. Agricultural Water Management, 2013,123:32-44.
- [18] 蔡焕杰,胡笑涛.灌溉排水工程学[M].3版.北京:中国农业出版社,2020.
Cai H J, Hu X T. Irrigation and drainage engineering [M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2020.
- [19] Weil R R, Brady N C. The nature and properties of soils

- [M]. 15th Edition, Global Edition. Harlow: Pearson Education, 2017.
- [20] Hopmans J W, Qureshi A S, Kisekka I, et al. Critical knowledge gaps and research priorities in global soil salinity [M] // *Advances In Agronomy*. Amsterdam: Elsevier, 2021.
- [21] 吴忠东,王卫华,张照录,等.咸淡水组合淋洗对土壤水盐分布特征的影响[J].排灌机械工程学报,2014,32(12):1085-1090.
Wu Z D, Wang W H, Zhang Z L, et al. Effect of infiltrated by fresh and saline water alternately on water-salt distribution properties[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2014,32(12):1085-1090.
- [22] Ayers R S, Westcot D W. *Water quality for agriculture* [M]. Rome: Food and Agriculture Organization, 1985.
- [23] Sastre-Conde I, Carmen Lobo M, Icela Beltrán-Hernández R, et al. Remediation of saline soils by a two-step process: washing and amendment with sludge [J]. *Geoderma*, 2015,247/248:140-150.
- [24] 吴忠东,王全九.入渗水矿化度对土壤入渗特征和离子迁移特性的影响[J].农业机械学报,2010,41(7):64-69,75.
Wu Z D, Wang Q J. Effect on both soil infiltration characteristics and ion mobility features by mineralization degree of infiltration water[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010,41(7):64-69,75.
- [25] 刘静妍.不同灌溉模式的微咸水入渗特性和土壤水盐分布特征[D].太原:太原理工大学,2015.
Liu J Y. Soil infiltration and water salt distribution under the saline water supply conditions [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015.
- [26] 牟晓宇,庞桂斌,张立志,等.微咸水灌溉对盐碱地土壤水盐分布与冬小麦产量的影响[J].中国农村水利水电,2019(8):28-35.
Mu X Y, Pang G B, Zhang L Z, et al. Effects of brackish water irrigation on water-salt distribution and winter wheat yield in saline-alkali areas[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2019(8):28-35.
- [27] 张作为,李宏宇,付强,等.化肥有机肥配施对河套灌区土壤盐分及玉米水肥利用的影响[J].应用基础与工程科学学报,2023,31(5):1170-1182.
Zhang Z W, Li H Y, Fu Q, et al. Effects of combined application of chemical and organic fertilizers on soil salinity and corn water and fertilizer utilization in Hetao irrigation district[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2023,31(5):1170-1182.

(上接第246页)

- [19] 谢潇.压实黄土土-水特征曲线及其孔隙特征分析[D].西安:长安大学,2018.
Xie X. Study on soil-water characteristic curve and pore characteristics of compacted loess [D]. Xi'an: Changan University, 2018.
- [20] 陈正汉,苗强强,郭楠,等.关于持水特性曲线研究的几个问题[J].岩土工程学报,2023,45(4):671-679.
Chen Z H, Miao Q Q, Guo N, et al. On some problems of researches on soil-water retention curve[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023,45(4):671-679.
- [21] Gardner W R. Calculation of capillary conductivity from pressure plate outflow data[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1956,20(3):317-320.
- [22] Brooks R H. *Hydraulic Properties of Porous Media* [D]. Fort Collins: Colorado State University, 1965.
- [23] van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980,44(5):892-898.
- [24] Fredlund D G, Xing A Q. Equations for the soil-water characteristic curve [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994,31(4):521-532.
- [25] 徐绍辉,张佳宝,刘建立,等.表征土壤水分持留曲线的几种模型的适应性研究[J].土壤学报,2002,39(4):498-504.
Xu S H, Zhang J B, Liu J L, et al. Suitability of models describing soil water retention curve [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002,39(4):498-504.

(上接第256页)

- [28] Nie Y P, Chen H S, Wang K L, et al. Rooting characteristics of two widely distributed woody plant species growing in different karst habitats of southwest China [J]. *Plant Ecology*, 2014,215(10):1099-1109.
- [29] 李若莹,范碧航,林珂,等.黄土高原沟壑区不同植被恢复方式对降雨入渗的影响[J].水土保持学报,2025,39(4):60-70.
Li R X, Fan B H, Lin K, et al. Effects of different vegetation restoration on rainfall infiltration in the loess plateau gully region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025,39(4):60-70.
- [30] Nie Y P, Chen H S, Wang K L, et al. Water source utilization by woody plants growing on dolomite outcrops and nearby soils during dry seasons in karst region of Southwest China [J]. *Journal of Hydrology*, 2012,420:264-274.