

滴灌灌水量对风沙土大豆根区 硝态氮及水分分布的影响

刘富强¹, 窦超银¹, 李祥瑞¹, 陈伟²

(1.扬州大学水利科学与工程学院,江苏扬州 225009; 2.辽宁省水利水电科学研究院,辽宁沈阳 110000)

摘要:为合理进行风沙土地区灌溉管理,将水肥控制在根区范围内并满足大豆生长需求,以灌水量为试验因素,基于作物冠层蒸发皿蒸发量设置0.4(W1)、0.6(W2)、0.8(W3)、1.0 E_{pan} (W4)和1.2 E_{pan} (W5)5个灌溉水平,研究不同灌水量对大豆根区硝态氮和水分分布的影响。结果表明:增加灌水量会使土壤水分入渗深度增加10~30 cm,增大根区土壤水分分布的不均匀性,苗期W5处理剖面水分平均值较W1处理增大40.22%,W4、W5处理能够维持大豆根区6%~7%的土壤含水率。硝态氮有明显表聚现象,随着灌水量的增大,淋洗深度增加且不均匀性增大,根区土壤硝态氮平均含量降低,当灌水量高于1.0 E_{pan} 时,硝态氮含量低于10 $mg \cdot kg^{-1}$ 。W2、W3和W4处理能保证大豆根区在生育前、中、后期处于15~22 $mg \cdot kg^{-1}$ 的硝态氮浓度区间,垂直方向上灌水量与硝态氮呈负相关关系。风沙土土壤剖面含水率均在4%~10%之间,灌水量是影响风沙土硝态氮含量和分布的主要因素之一;各处理硝态氮含量在10~30 $mg \cdot kg^{-1}$ 之间。综合考虑作物对根区土壤水分和硝态氮含量的需求,以及土壤水分和硝态氮在根层的分布特征,推荐灌溉水量为1.0 E_{pan} 。

关键词:风沙土;大豆根区;滴灌;硝态氮;水分分布

中图分类号:S275.6;S565.1;S365 **文献标志码:**A

Effects of drip irrigation amounts on nitrate-N and water distribution in the root zone of soybean in a wind-sandy soil

LIU Fuqiang¹, DOU Chaoyin¹, LI Xiangrui¹, CHEN Wei²

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China;

2. Liaoning Institute of Water Conservancy and Hydropower Science Research, Shenyang, Liaoning 110000, China)

Abstract: The objective of this study was to examine the effects of controlling water and fertilizer inside the root zone and at the same time, meeting soybean development requirements by more logically managing irrigation in wind-sandy soil environment. Based on the evapotranspiration of the crop canopy at five irrigation levels of 0.4 (W1), 0.6 (W2), 0.8 (W3), 1.0 (W4), and 1.2 E_{pan} (W5), a field experiment was carried out to examine the effects of different irrigation levels on nitrate-N and water distribution in the root zone of soybean. Increasing the irrigation volume resulted in increase of the depth of soil moisture infiltration by 10~30 cm, increasing the uneven distribution of soil moisture in the root zone. The average water content of the W5 treatment profile during the seedling stage increased by 40.22% compared to the W1 treatment. The W4 and W5 treatments were able to maintain a soil moisture content of 6% to 7% in the soybean root zone. The nitrate-N exhibited a clear epimerization phenomenon. As irrigation volume increased, so did the depth of drenching, inhomogeneity, and average nitrate-N content of the root zone soil decreased. When irrigation volume exceeded 1.0 E_{pan} , nitrate-N was lower than 10 $mg \cdot kg^{-1}$. In the pre-fertility, mid-fertility, and late-fertility periods, the nitrate-N concentration interval of the soybean root zone was satisfied by the W2, W3, and W4 treatments, which were in the range of 15~22 $mg \cdot kg^{-1}$. The irrigation volume had a stronger negative vertical correlation with the nitrate-N content of the soybean root zone. The soil profile moisture content of wind-sandy soil was between 4% and 10%, and the amount of irrigation was one of the pri-

收稿日期:2023-10-05

修回日期:2023-12-21

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(51609208)

作者简介:刘富强(1997-),男,江苏如皋人,硕士研究生,研究方向为节水灌溉理论与技术。E-mail:1429526048@qq.com

通信作者:窦超银(1982-),男,江苏如皋人,高级工程师,博士,主要从事节水灌溉理论与技术及农业水土资源高效利用研究。E-mail:chydou@163.com

mary parameters influencing the distribution and nitrate-N content of wind-sandy soil; the nitrate-N content of each treatment varied between $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. The recommended irrigation water amount was $1.0 E_{\text{pan}}$, considering the crop's requirements for soil water and nitrate-N content in the root zone, as well as the features of soil water and nitrate-N distribution in the root layer.

Keywords: wind-sandy soil; soybean root zone; drip irrigation; nitrate-N; water distribution

辽西北地处科尔沁沙漠南缘,具有重要的生产安全屏障作用,是我国沙化严重、生态脆弱的重点治理区域^[1]。风沙土作为这一区域主要的土壤类型,由于处于土壤发育的初级阶段,土质瘠薄、结构松散、保水保肥能力差,严重制约了当地农业生产发展。自国家在东北地区开展“节水增粮”项目以来,滴灌等先进的节水灌溉技术在辽西北地区得到广泛应用。其中,滴灌技术对水肥调控的能力与风沙土的天然劣势相契合^[2],对风沙土的可持续利用具有积极调控作用^[3]。

滴灌水肥一体化可以实现“以水促肥,以肥调水”的目标,水氮耦合能充分发挥水与肥的协同效应^[4]。水肥互作条件下“肥随水走”现象明显,高灌水使氮素向土壤深层淋洗,在湿润锋边缘产生累积,成为“废料”^[5];低灌水虽然在植株根层形成氮素高值区,长效供应作物养分,但低水条件又易对作物产生水分胁迫,限制作物生长发育,因此适宜灌水量成为相关学者研究的热点。张新燕等^[6]研究发现壤土灌水量为 $70\% ET_0$ 时, $20 \sim 40 \text{ cm}$ 土层深度范围内土壤含水率分布较高,且硝态氮与水分分布一致, $0 \sim 30 \text{ cm}$ 硝态氮含量均高于底层土壤均值;忠智博等^[7]研究发现灌水量为 $3\ 750 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,砂壤土湿润,水分流失少,土壤氮素分布均匀,有利于植物根系吸收;吴现兵等^[8]发现壤土分别以田间持水量的 100% 和 85% 作为灌水上、下限时, $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层硝态氮含量较高,土壤保持较高的含水率和较小的变异系数;王振华等^[9]研究发现在中壤土条件下作物耕层硝态氮含量随着灌水量的增长而不断淋失,在灌水量为 $3\ 000 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 时能维持油葵根区较高的含水量和硝态氮含量。以上研究表明滴灌工程效益的发挥主要取决于确定适宜的滴灌量,但风沙土土壤结构与上述研究差异性大,质地疏松的土壤结构极易引起水分和氮素的流失,现有的作物灌溉制度不具备通用性,难以在风沙土上进行推广,因此必须通过试验重新确定灌水量。

一直以来,风沙土滴灌技术的应用以解决缺水问题为主^[10],随着研究的逐步深入,肥料供应成为制约高产的瓶颈^[11]。通过高频灌溉来维持根系适宜水分条件,与持续淋洗加重养分淋失构成风沙土利用的主要矛盾^[12],前人关于确定灌水量参数的研究也为风沙土地区水肥供应的进一步研究提供了参考。因此,

本研究针对风沙土地区气候和土质特点,以大豆为研究对象,研究不同灌水量对作物根区水分和硝态氮分布和含量的影响,从水氮调控角度筛选适宜的灌水量,以期辽西北风沙土土壤的灌溉制度优化提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于辽宁省彰武县阿尔乡镇北甸子村 ($122^\circ 23' E, 42^\circ 50' N$),与科尔沁沙地南缘毗邻。试验区多年平均降雨量约为 412 mm ,最大降雨集中在 7—8 月;年均蒸发量为 $1\ 781 \text{ mm}$;年平均气温为 6.1°C ,平均风速为 $3.7 \sim 4.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,有时出现沙尘暴天气;作物生长周期为 $145 \sim 150 \text{ d}$,其中无霜期达 154 d 。风沙土是本试验区土壤的主要组分,干容重为 $1.69 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,土壤有机质 $0.66 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮 $7.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $1.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $19.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $0.026 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

试验在 2022 年 5—10 月开展,供试品种为‘新豆一号’。大豆生长期划分为苗期、开花期、结荚期、鼓粒期、成熟期 5 个生育阶段。试验以灌溉水量为因素,由于风沙土保水性差,漏水漏肥严重,前期模拟试验表明灌溉频率为 5 d 时土壤含水率下降很小,因此以 5 d 累积冠层水面蒸发量 (E_{pan}) 为参考,设置 5 个水平,分别为 $0.4 (W1)$ 、 $0.6 (W2)$ 、 $0.8 (W3)$ 、 $1.0 (W4)$ 、 $1.2 E_{\text{pan}} (W5)$,每个处理重复 3 次。灌水周期根据前期试验结果确定为 5 d,单次灌水量通过计算得出,计算结果为负值计入下一周期:

$$W = (E_{k,5} - P_{k,5})$$

式中, W 为单次灌水量 (mm); $E_{k,5}$ 为第 k 个 5 日累计蒸发量 (mm),逐日实测; $P_{k,5}$ 为第 k 个 5 日累计有效降雨量 (mm)。

施肥总量以 $270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (纯氮) 为参考,其中基肥为 $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (纯氮),在起垄-播种-覆膜-施肥一体机春播时施入。追肥时将肥料(尿素)溶解,注入重力滴灌桶,以水肥一体化的形式在苗期、开花期和结荚期按照 $2:2:1$ 进行灌溉施肥。

1.3 测定项目与方法

分别在大豆生育前期、中期和末期(苗期、结荚期、成熟期)用土钻取土样,取样日期选择在生育期

内灌溉前,取样点以小区中部一滴头(剖面图位置为0-0)为中心,水平方向分别距滴头距离为0、10、20、30、50 cm,垂直方向取样深度分别为0~10、10~20、20~30、30~40、40~60 cm(图1),每个小区取25个土样。土壤含水率测定采用烘干法;土壤硝态氮含量测定采用紫外分光光度法。

分析计算时,水平方向不同距离的土壤含水率和硝态氮含量为该点各深度测定结果的加权平均值;垂直方向不同深度土壤含水率和硝态氮含量为同一深度各水平检测点测定结果的加权平均值。剖面土壤含水率和硝态氮含量平均值为剖面内所有测定值的加权平均值。

1.4 试验材料

试验中滴灌带为普通内镶式滴灌带,滴头流量为 $1.38 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$,白色地膜厚度为 0.008 mm 。

1.5 数据分析

用Excel 2021进行试验数据的整理,用Origin 2023作图,用SPSS 24.0进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同滴灌水平对大豆生育期土壤含水率的影响

图2A(a~e)为大豆苗期土壤剖面含水率,各处理土壤剖面含水率为4%~8%,含水率等值线分布不均匀,总体规律表现为:垂直方向中下层的土壤含水率高于表层土壤;水平方向土壤水分有向垄沟移动的趋势,且随着灌水量的增大其运移更加明显,各土层间土壤水分差异较小(1.5%~3.0%)。不同灌水处理间,随着灌水量的增大,土壤剖面平均含水率逐渐增大,W1处理为4.55%,W5处理为6.38%,W5较W1增长40.2%。

图2B(f~j)为大豆结荚期土壤剖面含水率分布。各灌水处理0~30 cm不同土层含水率等值线分布均匀,分布区间为3%~5%。W1~W5处理10~20 cm土层平均含水率为3.4%,30~60 cm土层平

均含水率为5.6%,底层含水率较表层增加66.3%。W1~W5处理土壤平均含水率分别为4.55%、4.52%、4.82%、5.13%、6.38%,差异仅为1.86%。水平方向上各处理土壤含水量分布均匀,高、低灌水处理并未显示出差异。垂直方向上各处理分层现象明显,底层含水率均高于表层,在30~40 cm处形成6%~7%的湿润体。以上现象产生的原因可能是因为结荚期处于7月末~8月中旬,气温为全年峰值,虽然有地膜覆盖,减小了水分上行蒸发,但低含水率下沙土较高的导热性^[13]使得水分逸出,凝结于地膜或以汽体的形式存在于地膜与表层沙土间^[14];加之沙土毛管压力微弱^[15],下层水分难以补充表层水分亏缺,因此表层土壤水分分布均匀且处于较低值。底层土壤温度较低,且灌入的水分在重力作用下向更深层运移^[16],从而在40~60 cm处形成含水率6%~7%的湿润体。

图2C(k~o)为大豆成熟期土壤剖面含水率分布。各处理土壤含水率等值线凹凸不平,表明沙土中土壤含水量分布不均匀。垂直方向上,底层含水率高于表层,W1~W5处理30~60 cm土壤含水率较0~20 cm分别增长33.7%、68.7%、86.1%、55.1%、46.1%;水平方向上,0~20 cm和20~60 cm的土壤平均含水率分别为4.5%和5.5%。结荚后期不进行灌水处理,深层因重力作用形成含水率为7%的湿润体,在垄沟蒸发力的牵引下向垄沟靠近^[12]。

大豆生育前、中、后期土壤水分分布结果表明,随着灌水量的增大,土壤水分在垂直方向30~60 cm处形成湿润体,水平方向上会促使水分向垄沟靠近,同时降低土壤水分分布均匀性。灌水量增大会提高土壤剖面平面含水量,其中W4、W5处理能够维持大豆根区6%~7%的土壤含水率。生育前期不同灌水梯度对土壤水分的影响无明显差异,生育中期高温会削弱不同灌水梯度之间的差异,生育后期作物根区水分减少。

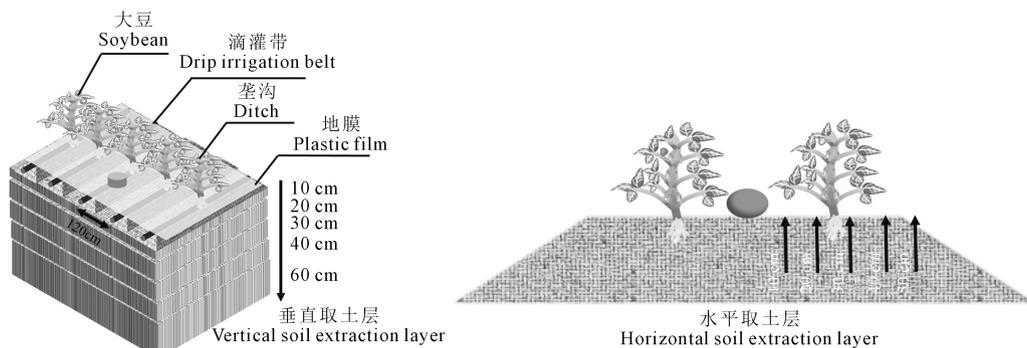
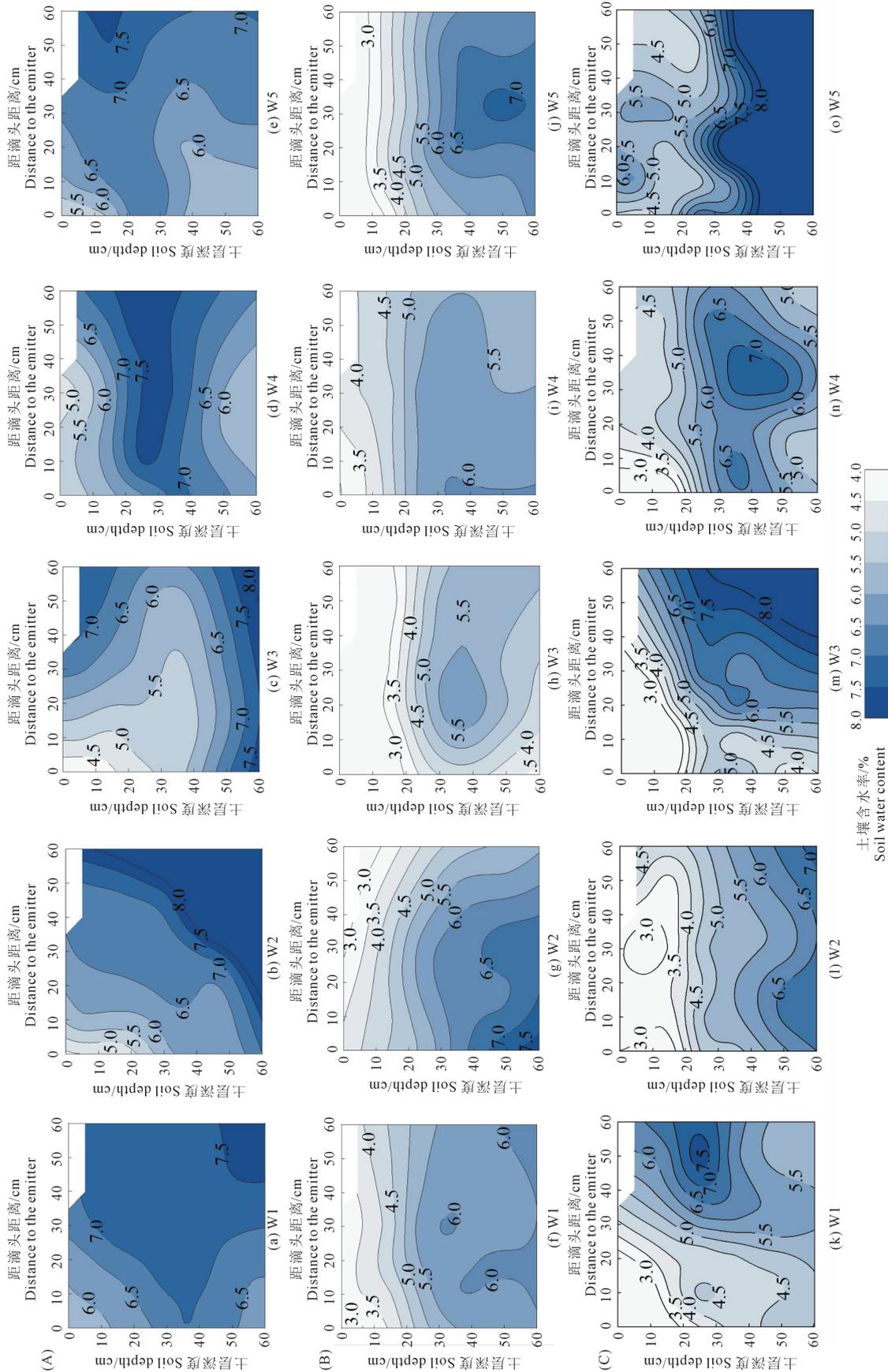


图1 取样点示意图

Fig.1 Schematic diagram of sampling points



注：图中A、B、C分别为大豆苗期、结荚期和成熟期。a、b、c、d、e分别为苗期W1~W5处理；f、g、h、i、j分别为结荚期W1~W5处理；k、l、m、n、o分别为成熟期W1~W5处理。下同。
 Note: Soybean seedling, pod-setting, and maturity stages are represented by A, B, and C in the illustration, respectively. The following treatments correspond to different stages of the plant life cycle: a, b, c, d, and e are seedling stage W1 to W5 treatments; f, g, h, i, and j are pod-setting stage W1 to W5 treatments; k, l, m, n, and o are maturity stage W1 to W5 treatments. The same below.

图 2 土壤含水率空间分布
 Fig.2 Spatial distribution of soil water content

2.2 不同滴灌水平对大豆生育期土壤硝态氮分布的影响

图3A(a~e)为大豆苗期硝态氮空间分布。随着灌水量的增大,各处理土壤剖面硝态氮平均含量逐渐减小,其中W1、W5处理分别为 $15.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $10.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,W5较W1处理减少31.8%。垂直方向上,硝态氮随着土层深度的增大而减小,其中W1处理在滴头下方0~20 cm处形成 $20 \sim 22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的硝态氮高值区,W2、W3处理同样具备这种集聚趋势,但由于灌水量的提升,硝态氮高值区浓度下降,仅为 $14 \sim 16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。W4、W5处理灌水充分,硝态氮被淋洗至深层。水平方向上,W4处理在30~40 cm处形成 $16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的硝态氮高值区,W1~W3处理灌水较少,因此水平方向硝态氮迁移少,多在0~20 cm范围内变化。W5处理又因灌水过多致使土壤剖面硝态氮含量不断被淋洗稀释。

图3B(f~j)为大豆结荚期硝态氮空间分布。随着灌水量的增大,各处理土壤剖面硝态氮平均含量逐渐减小,这与苗期表现规律相同,其中硝态氮含量峰值为W1处理 $14.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。W1~W4处理均在滴头正下方形成硝态氮高值区,这与张翠翠等^[17]研究结果一致。随着灌水量的增大,硝态氮高值区纵深越大,其中W3、W4处理较W2处理增长100%。这是因为溶解氮肥在水肥一体化的施入方式下易随水迁移,通过对流在土壤中运动,即产生“肥随水走”的现象,因此硝态氮能够同步到达湿润锋处^[18],并富集累积形成硝态氮高值区。随着灌水的增多,垂直方向湿润锋运移更深,灌水逐渐增高的W3、W4处理组硝态氮高值区范围达40 cm。W5处理由于灌水过多致使根区硝态氮浓度仅为 $16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,湿润锋运动半径扩大,在水平吸力和垂直重力的双重引导下,分布区间逐渐向土层对角线靠近。

图3C(k~o)为大豆成熟期硝态氮空间分布。W1~W5处理硝态氮平均含量分别为9.0、7.7、8.5、9.7、7.7 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,较苗期分别下降71.2%、56.9%、47.7%、38.9%、36.3%。这是因为生育前期有基肥作铺垫,土壤中硝态氮相对维持在高水平,但随着大豆生长旺盛期不断吸收利用土壤中的硝态氮等元素,生育期内有效降雨频次的增多以及单次灌水对硝态氮的不断淋洗,土壤硝态氮不断被消耗。随着灌水量的增加,硝态氮损耗的降幅不断减小,由

71.2%降至36.3%,差异达34.9%,W4处理在生育末期大豆根区依旧保持着硝态氮 $17 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的高值区。

大豆生育期土壤硝态氮迁移规律结果表明,低量灌水可以在滴头正下方产生硝态氮高值区,高量灌水会稀释土壤硝态氮的平均含量,硝态氮等值线会逐渐接近土层对角线。生育中期,受高温蒸发影响,W1~W4处理均在滴头正下方形成硝态氮高值区,但硝态氮分布纵深随着灌水量的增大而增大。生育末期,各灌水处理土壤硝态氮平均含量均较年初有一定的下降,但随着灌水量的增大,下降幅度逐渐减小。W2、W3和W4处理能满足大豆根区在生育前、中、后期处于 $15 \sim 22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的硝态氮浓度区间。

2.3 大豆各生育期水、肥分布的相关性

各处理土壤含水率与硝态氮含量平均值相关性分析如表1所示,水平方向土壤含水率与硝态氮之间并无显著差异,成熟期W1~W3处理两者呈负相关关系,其余相关系数接近中等水平。垂直方向上,生育前、中、后期W1~W3处理两者均呈负相关关系,其中W1处理在苗期和结荚期为显著相关,相关系数分别为-0.899和-0.941,成熟期时为极显著相关,相关系数为-0.981。W4处理在成熟期两者呈显著正相关关系,相关系数为0.915。以上结果表明,垂直方向上灌水量与硝态氮多呈负相关关系,即灌水量越大硝态氮含量越低,在低灌水处理(W1)尤为明显,贯穿生育前后期,水平方向两者未达显著差异。结果反映了硝态氮在风沙土中易受垂直方向灌水淋洗,与前人研究结果^[19-21]一致。

2.4 灌水处理对大豆产量及产量因子的影响

表2为各灌水处理对大豆产量及产量因子的影响。大豆单株荚数、单株粒数、单株粒重随着灌水量的增加呈现先增加再减小的趋势,W4处理为峰值。W4处理单株粒数显著高于其他处理($P < 0.05$),较W1处理增加46.43%。W4处理单株荚数、单株粒重、结实率和百粒重未与其他处理呈显著差异,但较W1处理分别增加43.98%、48.44%、7.02%、12.24%。大豆空粒数随着灌水量的增加而增加,其中W5处理达每株31.75粒。W4处理下大豆产量和NPPF分别为 $3.78 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $13.98 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$,较W1处理分别增加46.51%和57.78%。

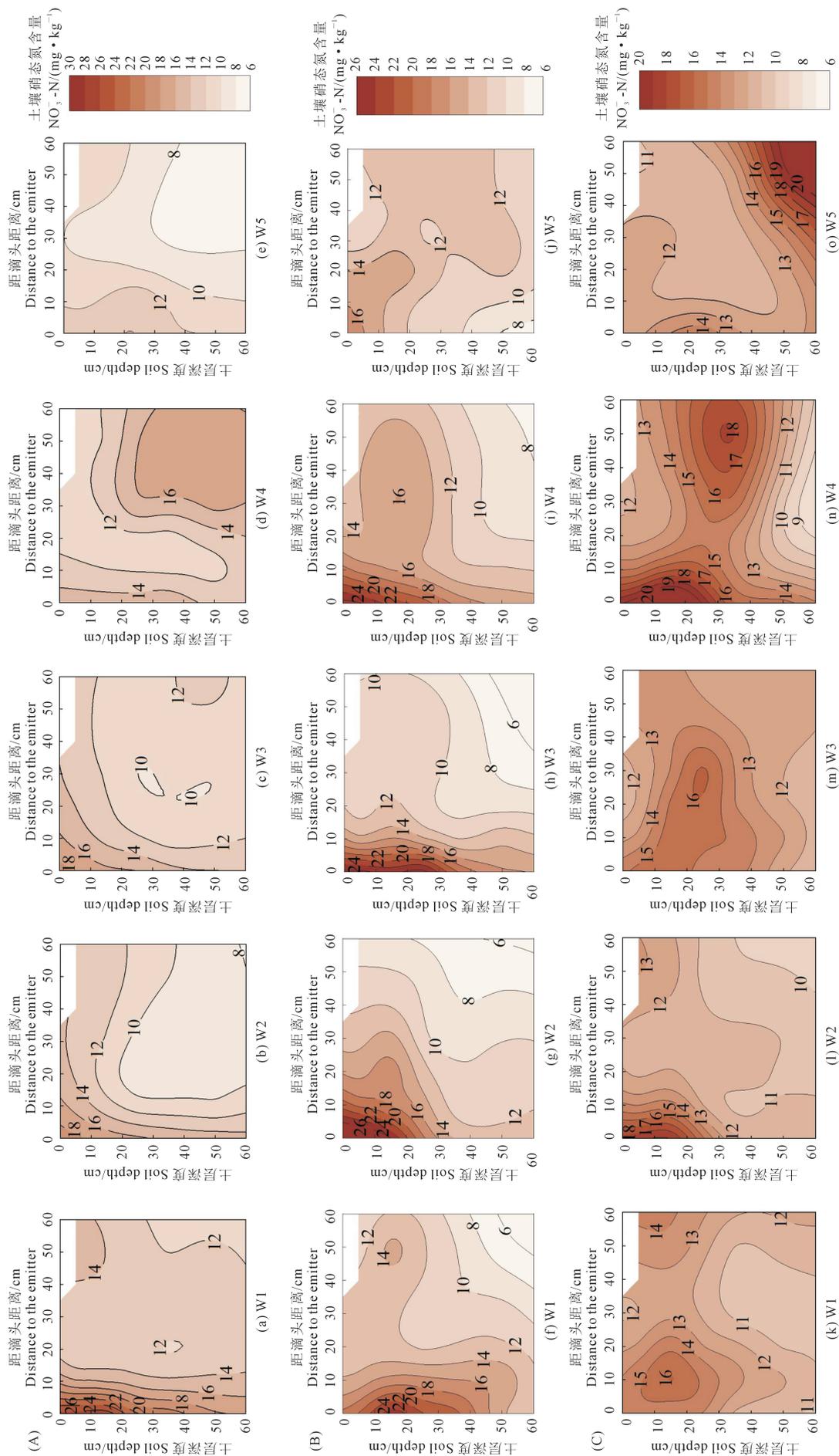


图 3 土壤硝态氮空间分布
Fig.3 Spatial distribution of soil nitrate-N

表 1 各处理剖面含水率与硝态氮相关性分析

Table 1 Correlation analysis between water content and nitrate-N in each treatment profile

方向 Orientation	生育期 Growth period	项目 Item	W1	W2	W3	W4	W5
垂直方向 Vertical orientation	苗期 Seedling stage	相关系数 Correlation coefficient	-0.899 *	-0.463	-0.773	0.658	-0.521
		P 值 P value	0.038	0.432	0.125	0.228	0.368
	结荚期 Pod-bearing stage	相关系数 Correlation coefficient	-0.941 *	-0.748	-0.688	-0.817	-0.527
		P 值 P value	0.017	0.146	0.199	0.092	0.361
	成熟期 Maturity period	相关系数 Correlation coefficient	-0.981 **	-0.294	-0.336	0.915 *	0.497
		P 值 P value	0.003	0.631	0.580	0.029	0.394
水平方向 Horizontal orientation	苗期 Seedling stage	相关系数 Correlation coefficient	0.634	0.404	0.627	0.416	0.552
		P 值 P value	0.251	0.500	0.257	0.486	0.334
	结荚期 Pod-bearing stage	相关系数 Correlation coefficient	-0.053	0.407	0.723	0.465	0.661
		P 值 P value	0.933	0.496	0.168	0.430	0.224
	成熟期 Maturity period	相关系数 Correlation coefficient	-0.564	-0.730	-0.332	0.389	0.043
		P 值 P value	0.322	0.162	0.586	0.517	0.946

注:表中 N 表示相应灌水处理下土壤硝态氮含量。* 和 ** 分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平差异显著。

Note: Under the corresponding irrigation treatments, N in the table denotes soil nitrate-N content. * and ** respectively indicate significant differences at the $P<0.05$ and $P<0.01$ levels.

表 2 各处理大豆产量及产量因子

Table 2 Soybean yield and yield factors by treatment

处理 Treatment	单株荚数 Number of pods per plant	单株粒数 Number of grains per plant	单株粒重 Grain weight per plant/g	空粒数/粒 Empty grain count	结实率 Fruitin percentage/%	百粒重 100-grain weight/g	产量 Yield/(t · hm ⁻²)	氮肥偏生产力 NPPF /(kg · kg ⁻¹)
W1	118.67±10.64a	187.00±19.79ab	50.60±5.75a	27.20±1.59a	72.61±4.46a	28.91±1.34a	2.58±0.36a	9.57±1.34a
W2	118.67±16.21a	153.60±19.00b	50.45±6.60a	29.00±1.47a	73.68±3.93a	29.98±3.53a	2.57±0.23a	9.53±0.84a
W3	142.00±21.32a	213.00±18.24ab	64.57±4.85a	29.50±5.36a	74.69±3.29a	30.68±1.48a	3.31±0.30a	12.27±1.10a
W4	170.83±22.37a	273.83±51.96a	75.11±13.51a	30.00±4.58a	77.71±2.22a	32.45±2.63a	3.78±0.59a	13.98±2.20a
W5	144.20±29.24a	229.60±50.11ab	68.87±16.03a	31.75±5.25a	75.24±5.53a	30.06±2.83a	3.49±0.92a	12.94±1.03a

3 讨论

苗期各灌水处理间并未显示出明显差异,土壤水分以垂直运移为主。增大灌水量可以增加湿润锋在垂直方向的运移距离^[22],增大土壤湿润体体积^[23],但本试验结荚期时并未表现出相似现象,可能是结荚期环境温度升高、土壤水分蒸发大导致。虽然各灌水处理存在梯度差异,但是由于大豆处于根系吸水旺盛时期,灌溉水分几乎全部用于根系吸水^[24],在作物生长生理特性、土质和蒸发三重因素的影响下,削弱了各灌水处理的土壤水分分布差

异,各处理表层土壤含水率均处于较低水平。成熟期各处理表层土壤水分均处于低值,但 40~60 cm 贮水量略高于苗期,且随着灌水量的增加贮水量越高,原因可能是成熟期大豆根系活力逐渐降低,大豆需水量逐渐减少,生育期内的灌水和降雨供水高于大豆水分消耗,因此成熟期深层贮水量较高。

本试验中,随着灌水量的增加,土壤剖面硝态氮含量逐渐降低,土壤含水率与硝态氮之间存在很好的相关性,体现了“肥随水来,水随肥去”的规律,与前人研究结果一致^[25]。硝态氮在土壤中的分布易受到生育期、土壤水分的影响^[26],生育前期硝态

氮浓度与入渗水分湿润锋运移一致,以垂直运移为主。低灌水条件下,硝态氮运移载体减少,纵向迁移距离短,易在表层土壤形成集聚,但随着灌水量的增加,硝态氮迁移纵径增大,W5 处理在重力作用和水平吸力的共同作用下,等值线线脊接近土层对角线。生育中期,硝态氮平均浓度虽然随着灌水量增加逐渐降低,但是其分布状态却大同小异,W1~W4 处理滴头下方均出现硝态氮高值区,因为高温和沙土较高的导热性使表层土壤水分蒸发,硝态氮运移载体减少,加之结荚期大豆生长发育旺盛,滴头下方 0~30 cm 为根系活动旺盛区域,根系吸附作用加强^[27],增大了植物根区的氮素积累,削弱了各灌水处理组的差异,从而 W1~W4 处理滴头下方出现硝态氮集聚。由于生育期内降雨频繁,前中期灌水次数累积,因此成熟期各土壤剖面硝态氮有向深层淋洗的趋势,且随着大豆生育过程中的不断消耗,土壤硝态氮含量较苗期有一定下降。

4 结 论

1) 风沙土 0~10、10~20、20~30、30~40、40~50、50~60 cm 土层土壤剖面含水率均在 4%~10% 之间。增加灌水降低了土壤水分分布的均匀性,W4 (1.0 E_{pan}) 和 W5 处理(1.2 E_{pan}) 能长效保持大豆根区 6%~7% 土壤含水率。

2) 风沙土中硝态氮以垂直迁移为主,W2 (0.6 E_{pan})、W3 (0.8 E_{pan}) 和 W4 处理能满足大豆根区在生育前、中、后期处于 15~22 $mg \cdot kg^{-1}$ 的硝态氮区间。风沙土硝态氮含量随生育期递进不断降低,成熟期 W1~W5 处理硝态氮含量较苗期分别下降 71.2%、56.9%、47.7%、38.9%、36.3%。

3) 土壤剖面含水率和硝态氮主要呈负相关,在垂直方向上相关性较高,增加灌水量并不能影响二者相关性。

4) 适当增加灌水有利于大豆产量的提高及产量因子的构建,W4 处理大豆产量和氮肥偏生产力最高,分别为 3.78 $t \cdot hm^{-2}$ 和 13.98 $kg \cdot kg^{-1}$ 。

综上所述,在风沙土地区对大豆进行滴灌灌溉时,综合考虑作物对根区土壤水分含量、硝态氮含量和产量的影响,以及土壤水分和硝态氮在根层的分布特征,推荐灌溉水量为 1.0 E_{pan} 。

参 考 文 献:

[1] 李雪华,季飞龙,李晓东,等. 辽西北地区 1998—2020 年气候变化对生长季 NDVI 影响的量化分析[J]. 生态学杂志, 1-9. (2023-04-04). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20230404.1110.002.html>.

LI X H, JI F L, LI X D, et al. Quantitative analysis of the influence of climate change on NDVI in the growing season from 1998 to 2020 in Northwest Liaoning[J]. Chinese Journal of Ecology, 1-9. (2023-04-04). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20230404.1110.002.html>.

[2] 傅民. 风沙土点源入渗条件下不同灌水策略对水磷运移的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2021.

FU M. Effects of different irrigation strategies on water and phosphorus transport under point source infiltration in aeolian soils[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2021.

[3] 唐士劫, 窦超银. 滴头流量对风沙土滴灌湿润锋运移影响的试验研究[J]. 节水灌溉, 2018, (11): 56-60, 72.

TANG S J, DOU C Y. An experiment study of the effects of dripper discharge on soil wetting front under drip irrigation in aeolian sandy soil [J]. Water Saving Irrigation, 2018, (11): 56-60, 72.

[4] 贺曰林, 王焯, 张宏锦, 等. 地表滴灌水氮耦合对毛白杨幼林生长及土壤水氮分布的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(20): 90-98.

HE Y L, WANG Y, ZHANG H J, et al. Coupling effects of water and nitrogen on tree growth and soil water-nitrogen distribution in young *Populus tomentosa* plantations under surface drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34 (20): 90-98.

[5] LI J S, ZHANG J J, REN L. Water and nitrogen distribution as affected by fertigation of ammonium nitrate from a point source [J]. Irrigation Science, 2003, 22(1): 19-30.

[6] 张新燕, 王浩翔, 牛文全. 水氮供应对温室滴灌番茄水氮分布及利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(9): 106-115.

ZHANG X Y, WANG H X, NIU W Q. Effects of water and N-fertilizer supplies on the distribution and use efficiency of water and nitrogen of drip-irrigated tomato in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(9): 106-115.

[7] 忠智博, 翟国亮, 邓忠, 等. 水氮施量对膜下滴灌棉花生长及水氮分布的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(1): 67-76.

ZHONG Z B, ZHAI G L, DENG Z, et al. The impact of N application and drip irrigation amount on cotton growth and water and N distributions in soil mulched with film[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(1): 67-76.

[8] 吴现兵, 白美健, 李益农, 等. 水肥耦合对膜下滴灌甘蓝根系生长和土壤水氮分布的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(17): 110-119.

WU X B, BAI M J, LI Y N, et al. Effect of water and fertilizer coupling on root growth, soil water and nitrogen distribution of cabbage with drip irrigation under mulch [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(17): 110-119.

[9] 王振华, 权丽双, 郑旭荣, 等. 水氮耦合对滴灌复播油葵氮素吸收与土壤硝态氮的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(10): 91-100.

WANG Z H, QUAN L S, ZHENG X R, et al. Effects of water-nitrogen coupling on nitrogen uptake and nitrate accumulation in soil of oil sunflower in drip-irrigated multiple cropping system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47 (10): 91-100.

[10] 王鼎新, 窦超银, 孟维忠, 等. 风沙土玉米膜下滴灌灌溉制度试验研究[J]. 节水灌溉, 2019, (8): 34-38.

WANG D X, DOU C Y, MENG W Z, et al. Experimental research

- onmulch-drip irrigation regime for maize in aeolian sandy soil [J]. *Water Saving Irrigation*, 2019, (8): 34-38.
- [11] 顾桂栋, 窦超银, 孟维忠, 等. 风沙土膜下滴灌氮肥运筹对玉米生长、干物质和产量的影响[J]. *节水灌溉*, 2021, (8): 25-30.
- GU G D, DOU C Y, MENG W Z, et al. Effects of nitrogen application of drip irrigation under mulch on growth, dry matter and yield of maize in aeolian sandy soil [J]. *Water Saving Irrigation*, 2021, (8): 25-30.
- [12] 王鼎新, 窦超银, 仲志成, 等. 风沙土不同滴灌水量对玉米根系水分和硝态氮分布的影响[J]. *节水灌溉*, 2020, (8): 22-26.
- WANG D X, DOU C Y, ZHONG Z C, et al. Effects of irrigation quota on water and nitrate distribution in maize root layer in aeolian sandy soil under drip irrigation [J]. *Water Saving Irrigation*, 2020, (8): 22-26.
- [13] 段妍, 晋华, 郑强. 含水率对黏土及沙土导热系数的影响[J]. *人民黄河*, 2016, 38(2): 114-116, 120.
- DUAN Y, JIN H, ZHENG Q. Testing study on moisture content effect on thermal conductivity for clay and sand [J]. *Yellow River*, 2016, 38(2): 114-116, 120.
- [14] 吴友杰, 杜太生. 覆膜沟灌下土壤水氢氧同位素分布特征及其水分运动规律研究[J]. *中国农村水利水电*, 2016, (9): 73-76.
- WU Y J, DU T S. Stable hydrogen and oxygen isotopic distributions and water movement in the soil under plastic film-mulching furrow irrigation [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2016, (9): 73-76.
- [15] REYES-CABRERA J, ZOTARELLI L, DUKES M D, et al. Soil moisture distribution under drip irrigation and seepage for potato production [J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 169: 183-192.
- [16] 李娟娟, 李利敏, 马理辉. 不同滴灌施肥量对沙地玉米氮效率及硝态氮的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2020, (5): 56-63.
- LI J J, LI L M, MA L H. Effects of different fertilization by drip irrigation on nitrogen efficiency and nitrate nitrogen in sandy land [J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2020, (5): 56-63.
- [17] 张翠翠, 闫凌云, 赵鹏, 等. 施氮对夏玉米氮素利用及土壤硝态氮积累的影响[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(18): 57-61.
- ZHANG C C, YAN L Y, ZHAO P, et al. The effect of nitrogen fertilization on nitrogen use efficiency by summer corn and on the accumulation of soil nitrate nitrogen [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(18): 57-61.
- [18] 袁念念, 刘凤丽, 李亚龙, 等. 水肥一体化对土壤和作物水氮利用影响研究进展 [C]//中国水利学会 2021 学术年会论文集第四分册, 北京: 中国水利学会, 2021: 107-113.
- YUAN N N, LIU F L, LI Y L, et al. Progress in research on the effects of water fertilization on soil and crop water and nitrogen use [C]//Proceedings of the 2021 Academic Annual Conference of the China Water Resources Society, Fourth Division, Beijing: China Water Resources Society, 2021: 107-113
- [19] 马革新, 张泽, 温鹏飞, 等. 施氮对不同质地滴灌棉田土壤硝态氮分布及棉花产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(3): 44-51.
- MA G X, ZHANG Z, WEN P F, et al. Effect of soil texture on the distribution of nitrate nitrogen in the soil profile and its influence on drip-irrigated cotton production [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, 36(3): 44-51.
- [20] 谭军利, 王林权, 王西娜, 等. 不同灌水模式对土壤水分和硝态氮分布的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2008, 27(5): 29-33.
- TAN J L, WANG L Q, WANG X N, et al. Influence of different irrigation patterns on the distribution of soil moisture and nitrate [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2008, 27(5): 29-33.
- [21] CHEN X L, TAGUE C L, MELACK J M, et al. Sensitivity of nitrate concentration-discharge patterns to soil nitrate distribution and drainage properties in the vertical dimension [J]. *Hydrological Processes*, 2020, 34(11): 2477-2493.
- [22] 孙玮皓, 申孝军, KADER M H A, 等. 滴灌施肥时序对不同质地土壤水氮分布的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(3): 47-53.
- SUN W H, SHEN X J, KADER M H A, et al. Optimal timing of fertilization in drip fertigation for bioavailable water and nitrogen in soils of different textures [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(3): 47-53.
- [23] 陆军胜, 张富仓, 范军亮, 等. 不同滴头流量和灌水量下农田土壤湿润体特征及其估算模型[J]. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(4): 19-26.
- LU J S, ZHANG F C, FAN J L, et al. Characteristics and estimation model of wetted soil volume under different drip discharge rates and irrigation amounts [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(4): 19-26.
- [24] 丁运韬, 程煜, 张体彬, 等. 滴灌灌水下限对夹砂层农田土壤盐分布和玉米生长的影响[J]. *土壤学报*, 2022, 59(3): 733-744.
- DING Y T, CHENG Y, ZHANG T B, et al. Effects of different thresholds of mulched drip irrigation on water and salt distribution and water use efficiency of maize in a sand-layered soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(3): 733-744.
- [25] 杨梦娇. 不同灌水量及施肥量条件下硝态氮在土壤中的分布规律 [D]. 石河子: 石河子大学, 2013.
- YANG M J. Distribution of $\text{NO}_3\text{-N}$ in the soil under different irrigation and fertilization conditions [D]. Shihezi: Shihezi University, 2013.
- [26] 焦玲, 武雪萍, 李晓秀, 等. 负压灌溉下土壤水氮分布对黄瓜氮素吸收和干物质的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2022, (9): 75-84.
- JIAO L, WU X P, LI X X, et al. Effects of soil water and nitrogen distribution on nitrogen absorption and dry matter of cucumber under negative pressure irrigation [J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2022, (9): 75-84.
- [27] 覃潇敏, 潘浩男, 肖靖秀, 等. 不同磷水平下玉米-大豆间作系统根系形态变化[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(9): 3223-3230.
- QIN X M, PAN H N, XIAO J X, et al. Root morphological changes in maize and soybean intercropping system under different phosphorus levels [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(9): 3223-3230.