

李晶,何志斌,王建兵,等.荒漠绿洲农田土壤水热动态及硝态氮淋溶特征[J].中国沙漠,2022,42(5):245–257.

荒漠绿洲农田土壤水热动态及硝态氮淋溶特征

李晶^{1,2},何志斌²,王建兵¹,马登科^{2,3},王丽莎^{2,3}

(1.甘肃省社会科学院,甘肃兰州730070;2.中国科学院西北生态环境资源研究院 临泽内陆河流域研究站/内陆河流域生态水文重点实验室,甘肃兰州730000;3.中国科学院大学,北京100049)

摘要:灌溉和氮肥的施用是保障干旱荒漠区农业生产的关键措施,但过量的氮肥会随水分淋溶至深层土壤或地下水中,从而导致氮素的损耗和地下水的污染。本研究以黑河中游荒漠绿洲过渡带两种开垦年限的农田土壤(风沙土和灰棕漠土)为研究对象,通过土柱模拟试验监测分析了玉米生育期和休闲期内土壤水分和温度的动态变化及硝态氮(NO_3^- -N)的淋溶规律,揭示了不同耕作年限农田土壤中硝态氮损耗的差异。结果表明:新绿洲农田深层渗漏及 NO_3^- -N的淋失主要发生在苗期—拔节期以及休耕期,深层渗漏年损失量97.65—105.1 mm,占年灌溉水总量(810 mm)的12%—13%, NO_3^- -N淋溶年损失量68.1—123.8 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,占年施氮总量的18.7%—34.2%,休耕期灌水致使生育期内土壤中大量积累的氮素淋溶至深层, NO_3^- -N淋失量是当年生育期内 NO_3^- -N淋失量的2.2倍;开垦年限较长的老绿洲农田在相同灌溉施肥条件下无深层渗漏和 NO_3^- -N的淋失现象发生,其“蓄水保墒”及抑制水分和 NO_3^- -N渗漏淋失的生态效应优于开垦年限较短的新垦绿洲农田。因此,为降低土壤水分损失和 NO_3^- -N淋失风险,建议新绿洲农田生育期内减少春季灌溉次数或降低灌水定额,冬季休耕期降低灌水定额或采取免冬灌措施,以此保证灌溉水资源的优化利用并减少农田氮素的淋失。

关键词:绿洲农田;含水率;温度;硝态氮;渗漏;淋溶

文章编号: 1000-694X(2022)05-245-13

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2022.00080

中图分类号: S274.3

文献标志码: A

0 引言

氮素是作物生长和品质形成所需的主要营养元素。农田氮肥的投入提高了作物产量,但是当氮肥施入量超过了作物最高需氮量时,大量的氮素以活性氮形式(NO_3^- , NH_4^+)淋失到地表水或地下水中^[1-3],对陆地生态系统氮循环过程产生深刻影响^[4-5]。在农业生态系统中施用过量的氮肥是地下水硝酸盐污染的主要原因,中国农田施氮量普遍为250—350 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,而对作物生长起作用的仅为150—200 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,40%左右的氮素滞留在土壤中或损失至地下水中,农田土壤硝态氮迁移转化过程及其淋溶趋势和潜力的研究成为热点和难点。目前,针对具体的研究目标,氮素迁移淋失的研究多针对地面以下1—2 m的根系层^[6]。根系层土壤氮素淋失量的估算可通过测定土壤氮素的输入和输出量,利用差减法计算土壤氮素

淋失到地下水的总量。在自然条件下,监测土壤氮素分布和输出的方法主要有深层取样法、多孔陶瓷抽滤土壤溶液法、瓦管流出测定法、渗漏计法、称重式蒸渗仪法。这些方法均在土壤自然状态下通过土钻取土或陶土杯、瓦管等装置抽滤、收集土壤溶液,能比较直观地反映土壤剖面养分分布状况,并可结合质量平衡法或模型间接计算出养分淋失量。但是,这些方法的操作过程相对复杂,耗时费力,无法实现对土壤中氮素淋溶动态的连续观测,因而无法实现对土壤氮素淋失过程的全面认识。

土柱模拟试验是研究土壤水分动态及养分迁移变化的常用方法^[7],可实现对研究指标动态的连续观测,有利于实现对土壤水分和养分变化过程的认识。Li等^[8]利用长宽为2.5 m、深2.0 m的土柱研究了华北平原地区小麦-玉米轮作制度下硝态氮淋失情况;Yang等^[9]在陕西关中平原地区利用土柱系

收稿日期:2022-05-24; 改回日期:2022-07-01

资助项目:国家自然科学基金创新研究群体项目(41621001);甘肃省科技厅软科学专项项目(21CX6ZA015);甘肃省陇原青年创新创业(个人)项目

作者简介:李晶(1987—),女,甘肃永登人,博士,副研究员,主要从事农业生态水文学研究。E-mail: lij8835@126.com

通信作者:何志斌(E-mail: hzbmail@lzb.ac.cn)

统通过5年的田间试验,对比了零施氮水平、传统农业施氮水平及优化施氮水平3种情况下硝态氮淋失量;任理等^[10]采用长、宽、高均为2 m的正方体非称重式渗透计抽滤及收集土壤溶液和土柱底部渗漏溶液,研究了不同施肥水平下冬小麦播种—返青生育期硝态氮淋洗动态,并建立了硝态氮在土壤中迁移时间的概率密度函数,运用该函数模型可模拟和预测土壤排水出流溶液中硝态氮浓度和淋洗量。与自然条件下采样监测方法相比,土柱模拟试验操作简单,观测频度高,更有利于实现对土壤水分动态及氮素淋溶过程的认识,因此,本研究采用土柱模拟方法开展了相关研究。

黑河流域是中国第二大内陆河流域,是典型的灌溉农业绿洲区,绿洲和荒漠两大景观单元镶嵌分布且相互影响,具有景观格局复杂、土地利用多样化的特征。近几十年,随着经济迅速发展和人口急剧增长,该地区大面积的荒漠被开垦为新农田。这种新垦沙地农田土壤肥力低,保水保肥性能差,是干旱区绿洲灌溉耗水和化肥施用最大的区域,也是地下水硝酸盐污染风险较高的区域^[11],但关于农田土壤氮素淋溶规律和淋溶量尚不明确,需要开展详实的相关研究。本文立足黑河中游绿洲灌溉农业区,以荒漠绿洲过渡带开垦年限不足20年的新垦沙

地农田土壤(灌耕风沙土)^[12]及绿洲区开垦年限大于50年的老绿洲农田土壤(灌耕灰棕漠土)^[13]为研究对象,利用土壤温湿度监测仪测定土壤含水量和土壤温度及模拟土柱测定的渗漏损失量,探究两种开垦年限的农田硝态氮淋溶规律,旨在揭示农业生产活动对土壤水热资源过程及硝态氮淋溶量的影响,以期荒漠农田水肥管理提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

试验布设在中国科学院临泽内陆河流域研究站(38°52'N、100°23'E,海拔1 361 m),该区位于黑河中游河西走廊中段临泽县北部边缘绿洲地区(图1),属于典型的温带大陆性干旱荒漠气候,年均气温7.6℃,年最高气温为39.1℃(8月),年最低气温为-27℃(1月);多年平均降水量为117 mm(1965—2010年),降水主要发生在7—9月;年均蒸发量2 390 mm,年均无霜期为165 d,初霜期一般在10月上旬至中旬;农田区域地下水位4—6 m。土壤母质主要为第四纪砂砾洪积—冲积物。土壤类型有黑河沿岸分布的绿洲潮土和灌淤土,以及绿洲边缘由荒漠土开垦后长期灌溉耕种形成的灌耕灰棕漠土和

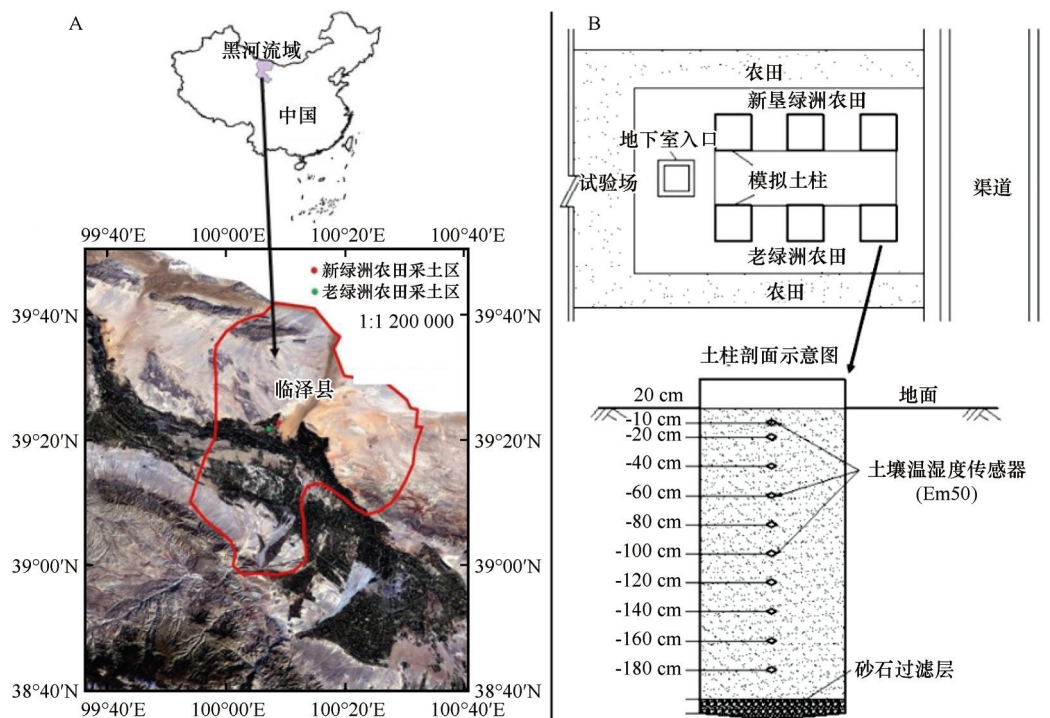


图1 研究区概况图(A)和土柱剖面示意图(B)

Fig.1 Experimental zone (A) and soil profile sketch map (B)

灌耕风沙土^[14]。由于开垦年限不同,形成熟化程度量低、持水性能差是其主要特征^[15],土壤机械组成各异的沙地灌溉农田,土壤砂粒含量高、有机质含量见表1,土壤基础肥力特征值见表2。

表 1 土壤机械组成
Table 1 Soil mechanical composition

农田类型	土质	土层深度/cm	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%	容重/(g·cm ⁻³)
新绿洲农田	灌耕风沙土	0—20	88.3	9.7	2.0	1.4
		20—40	92.4	6.4	1.2	1.5
		40—60	93.6	5.6	0.8	1.5
		60—80	92.0	6.9	1.1	1.4
		80—100	91.6	7.3	1.1	1.4
老绿洲农田	灌耕灰棕漠土	0—20	65.5	18.2	16.3	1.5
		20—40	76.7	11.5	11.8	1.6
		40—60	87.6	4.9	7.5	1.6
		60—80	91.8	2.3	5.8	1.6
		80—100	92.3	2.1	5.6	1.6

表 2 试验土壤基本肥力特征
Table 2 Basic fertility characteristics of experimental soil

农田类型	土质	土层深度/cm	pH	电导率EC/(mS·cm ⁻¹)	有机碳SOC/(g·kg ⁻¹)	全氮TN/(g·kg ⁻¹)	全磷TP/(g·kg ⁻¹)	全钾TK/(g·kg ⁻¹)
新绿洲农田	灌耕风沙土	0—20	8.04	0.11	4.88	0.62	0.49	17.79
		20—40	8.09	0.12	4.43	0.58	0.38	17.65
		40—60	8.76	0.23	3.70	0.51	0.44	17.46
		60—100	8.79	0.20	1.26	0.22	0.27	17.15
		100—140	8.87	0.19	0.67	0.17	0.26	17.12
		140—180	8.93	0.20	0.59	0.12	0.20	16.89
老绿洲农田	灌耕灰棕漠土	0—20	8.15	0.12	6.54	0.82	0.95	34.56
		20—40	8.21	0.13	5.42	0.81	0.87	35.14
		40—60	9.05	0.13	4.97	0.73	0.89	29.68
		60—100	9.13	0.13	3.34	0.45	0.74	28.59
		100—140	9.10	0.14	2.94	0.28	0.69	22.58
		140—180	8.99	0.17	2.77	0.20	0.57	19.58

1.2 试验设计

试验选用的土壤取自荒漠边缘新开垦的沙地农田(开垦年限 20 年左右),本研究中将其命名为“新绿洲农田”,另一种供试土壤取自荒漠边缘西南向的老绿洲农田(耕作历史大于 50 年),本研究中将其命名为“老绿洲农田”(图 1A),据全国第二次土壤普查结果显示,新绿洲农田和老绿洲农田的土壤类型分别为灌耕风沙土和灌耕灰棕漠土,研究区概况

及试验场布设如图 1 所示。试验采用原状土柱模拟,柱体材质为钢铁,呈长方体型,长宽均为 100 cm,高 200 cm。两种农田的土壤均按原状土容重分层回填至柱体内,每种农田土壤各设 3 个重复(图 1B)。每个土柱均装有 2 套 Em 50(Decagon, 美国)共 10 个监测探头,埋设深度从地表向下依次为 10、20、40、60、80、100、120、140、160 cm 及 180 cm 共 10 层,数据采集步长设置为 30 min;土柱底部铺设一层

10 cm厚的砂石过滤层,每个土柱底部滤液出口处设有渗漏水收集装置,灌水后对水分渗漏量和渗漏时间做详细记录。

试验场于2015年9月建成并完成土柱安装工作,2016年4月至2018年10月种植玉米。采用先覆膜后播种的方式,玉米播种间距为20 cm,行距为60 cm,播种深度为5—10 cm,播种密度8株·m⁻²。试验观测阶段分为2017年和2018年两个玉米生育期(2017年4月18日至2017年10月10日和2018年4月22日至2018年9月17日)以及一个休耕期(2017年10月10日至2018年4月22日)。试验过程中,灌溉和施肥方案均参考当地普遍的灌溉施肥习惯。两种耕作年限农田土壤土柱的灌溉定额(90 mm)、灌溉时间和次数、施肥量和施肥时间及其他的管理措施均一致,本研究假定两种农田土壤理化性质上存在的差异均源于不同的耕作年限。

1.3 灌溉和施肥

新、老绿洲农田实施相同灌溉制度,灌溉时间一致,灌水定额均为90 mm。2017年和2018年灌水次数均为8次,灌水总量为720 mm,2017年和2018年玉米生育期内降水量分别为99.4 mm和86.7 mm。2017年和2018年生育期内农田水分输入量分别为819.4、806.7 mm,两年间水分输入无明显差异。2017年和2018年均施肥3次,总施氮量分别为361.6 kg·hm⁻²和365 kg·hm⁻²,施肥时间和施氮量以当地农户施肥习惯为参考。于2017年10月15日进行秋灌处理,灌水量90 mm。

1.4 样品采集与测定

土柱灌溉后如有渗漏现象则对渗漏水进行称重,并用聚乙烯瓶盛放,收集瓶用待采集的水样清洗3—5次后盛250 mL的水样,将收集到的水样贴好标签后带回实验室放入冰箱冷冻待测;收集过程对收集时间、渗漏量变化做好记录;每次渗漏水样采集结束后对滤液收集容器进行更换,并用蒸馏水润洗2—3次;渗漏水样每6 h收集1次,渗漏速率降低时则每12 h或24 h收集1次,直至渗漏过程结束。

待测水样解冻后用中速定性滤纸过滤直至澄清,采用水化学间断分析仪(Smart Chem-140)测定水样中NO₃⁻-N的质量浓度。测定量程为0.025—10 mg·L⁻¹,当测定结果大于10 mg·L⁻¹时,则需要稀

释后再次测定。

1.5 土壤贮水量计算

土壤贮水量指一定土层厚度的土壤含水量,研究土壤贮水量变化特征在一定程度上可反映出冻融期土壤水分迁移的特殊规律^[16],其计算式为:

$$W = W_{\text{体}} \times h \times 10 \quad (1)$$

式中: W 为土壤贮水量(mm); $W_{\text{体}}$ 为土壤体积含水量(cm³·cm⁻³); h 为土层厚度(cm)。

1.6 硝态氮(NO₃⁻-N)累积淋溶量计算

$$L = \sum C_i \times V_i \times 10 \quad (2)$$

式中: L 为硝态氮累积淋溶量(kg·hm⁻²); C_i 为第 i 次淋溶液 NO₃⁻-N 质量浓度(mg·L⁻¹); V_i 为第 i 次淋溶液体积(mL)。

1.7 数据处理

将所采集的土壤含水率和温度数据分布保留到0.01 cm³·cm⁻³和0.01 °C。应用SPSS 19.0 (Chicago, IL, USA) 软件对数据进行分析处理,用Origin 8.5 进行绘图,用Surfer 11.0 (Golden Software, USA) 制图软件分析不同土壤类型含水量和温度时空变化特征。

2 结果与分析

2.1 试验期气温和降水情况

2017年和2018年平均气温分别为9.4 °C和8.5 °C。由气温变化曲线可知,两年气温变化均呈现先升高后降低趋势(图2),最高气温分别为30.3 °C和29.7 °C,均出现在7月中下旬。2017年和2018年降水事件主要发生在4—9月,年降水量分别为120.2 mm和99.0 mm,最大日降水量分别为20.2 mm和29.1 mm。

2.2 玉米生育期土壤水热特征

2.2.1 土壤水分时空动态变化过程

玉米生育期内新、老绿洲农田各层土壤水分随时间变化均呈现出先降低后增大的趋势,随土层深度的增大其变化幅度逐渐减弱,深层(140—200 cm)土壤水分始终保持在较高的水平(图3)。对比新、老绿洲土壤水分时空变化趋势可知,两种绿洲农田

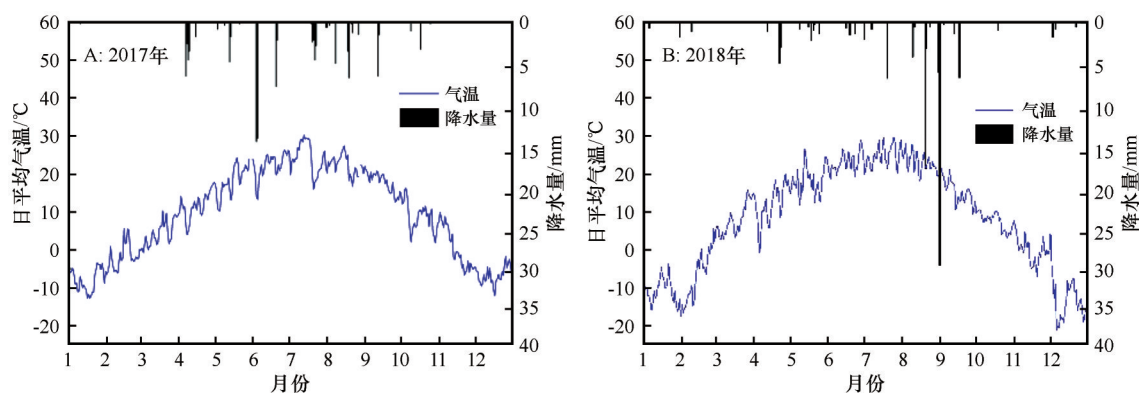


图2 2017年和2018年日均气温和降水量

Fig.2 The average daily temperature and precipitation in 2017 and 2018

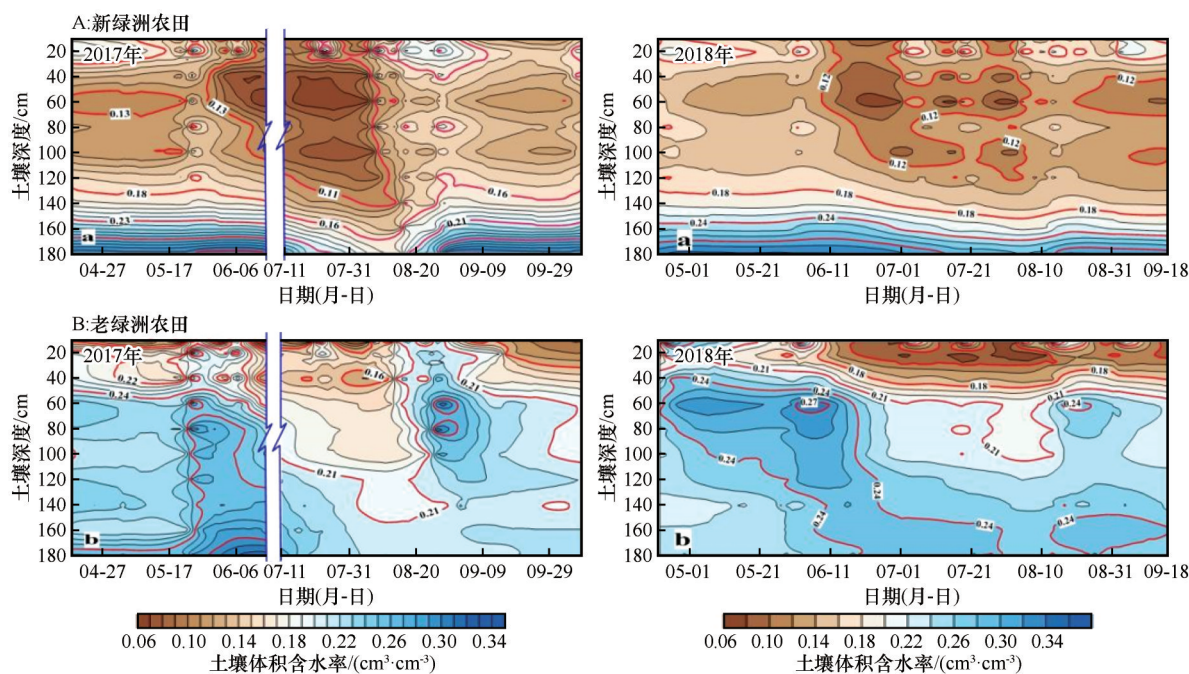


图3 2017年和2018年玉米生育期内土壤水分时空变化过程

Fig.3 Spatiotemporal variation of soil moisture during maize growth period in 2017 and 2018

土壤水分在时空分布上存在显著差异,新绿洲农田0—140 cm土层水分变化较为明显,而老绿洲农田则在0—120 cm变化明显。新绿洲农田0—140 cm土层水分显著低于老绿洲农田,140—200 cm土层两种农田土壤含水量均表现出变化幅度小、含水量高的特点。

2017年玉米生育期内受灌溉和降水的影响,土壤水分变化曲线均发生明显变化。2017年玉米苗期(4月底至5月中下旬)及灌浆期(8月中旬至9月初),灌水致使0—120 cm土层中水分变化较为明显,水分等值线密集。但拔节期—灌浆期(6—8月)灌水影响深度为0—40 cm。2018年生育期内老绿洲农田土壤水分变化情形与2017年相似,而新绿洲

农田0—120 cm土层水分在整个生育期内受灌水影响均发生显著变化。

2.2.2 土壤温度时空动态变化过程

2017年和2018年新、老绿洲农田土壤温度时空分布差异性不显著,各层土壤温度随时间均呈先升高后降低的变化趋势,且随土层深度的增大温度逐渐降低,变化幅度减小(图4)。0—40 cm表层土壤受气温变化及灌水影响,温度变化幅度较大,温度等值线较为密集,随土层深度的增加受气温和灌水影响逐渐减弱。2017年灌溉对两种农田土壤温度的影响范围为0—120 cm,而2018年影响范围为0—100 cm。

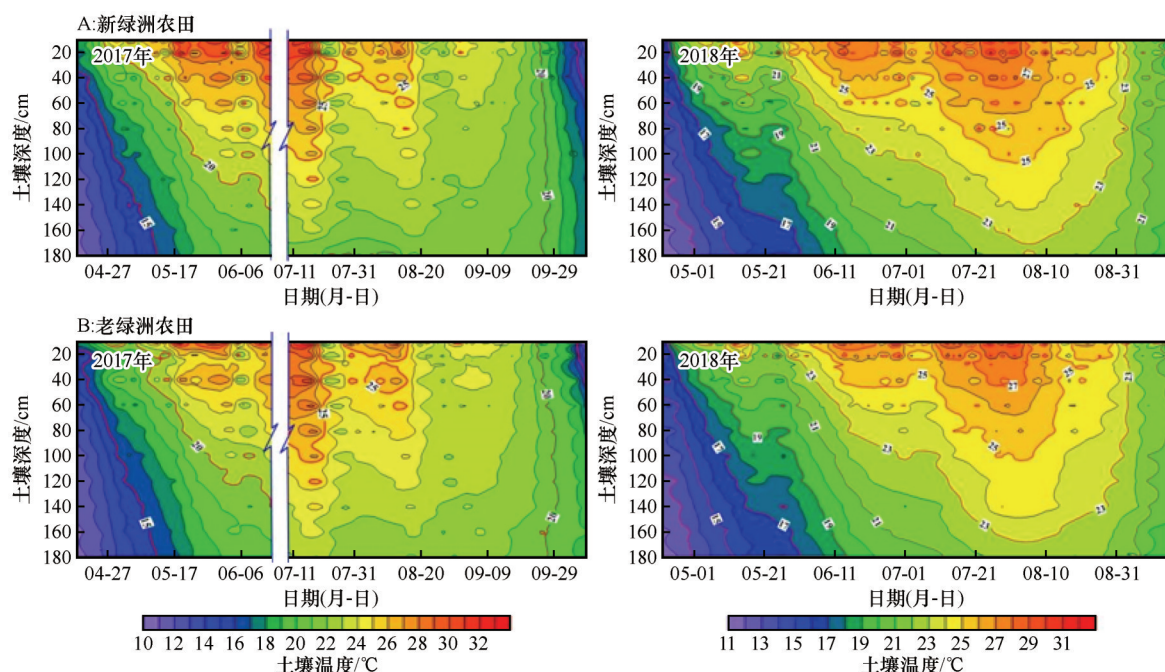


图4 2017年和2018年玉米生育期内土壤温度时空变化过程

Fig.4 Spatiotemporal variation of soil temperature during maize growth period in 2017 and 2018

2.3 玉米休耕期土壤水热特征

2.3.1 土壤水分时空动态变化过程

休耕期(2017年10月10日至2018年4月22日)

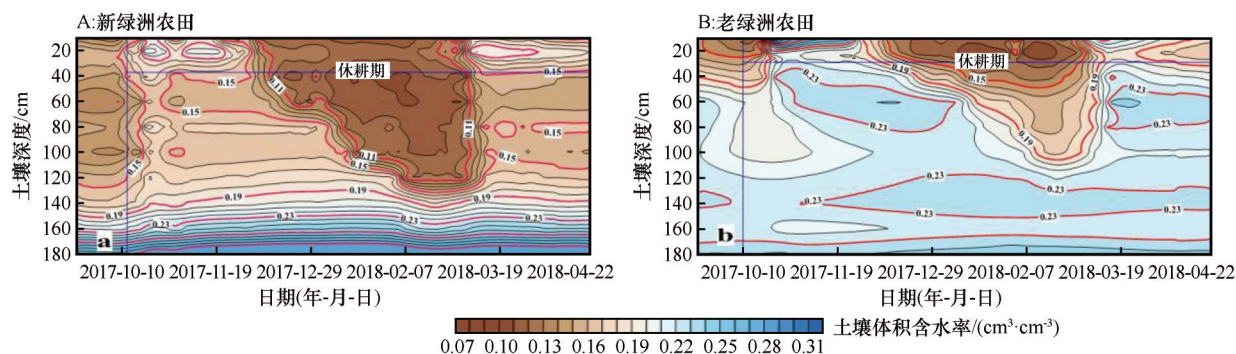


图5 2017年休耕期土壤水分时空变化过程

Fig.5 Spatiotemporal variation of soil moisture during fallow period in 2017

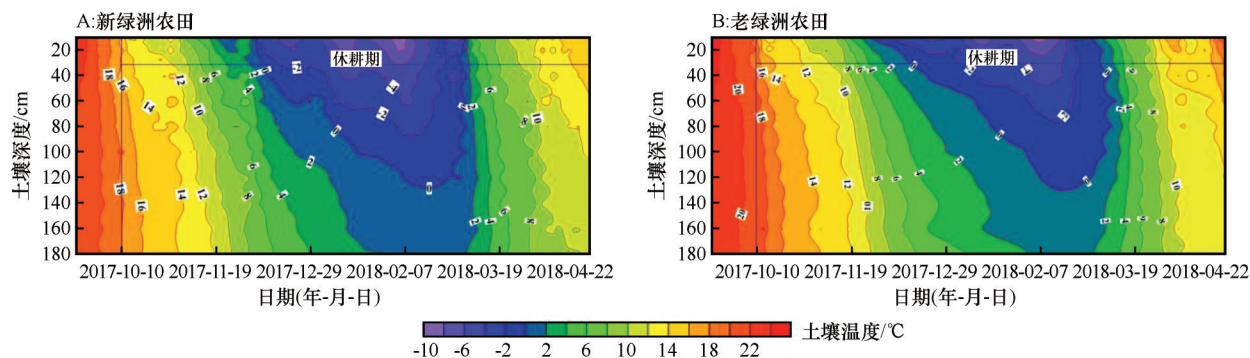


图6 2017年休耕期土壤温度时空变化过程

Fig.6 Spatiotemporal variation of soil temperature during fallow period in 2017

两种绿洲农田各层土壤水分时空变化存在显著差异(图5)。受2017年10月15日秋灌事件的影响,新垦绿洲农田0—140 cm土层内水分含量变化较为明显,各层土壤含水量均逐渐升高(图5A);老绿洲农

田土壤水分也呈逐渐升高趋势,但土壤水分仅在0—40 cm土层变化较为明显(图5B)。受大气温度影响,2017年11月下旬起贮存在土壤中的部分水分冻结后以固态形式存在,新、老绿洲农田土壤中液态水含量逐渐降低,等值线呈明显下降趋势,于2018年2月中下旬达最低水平,3月初土壤完全融化后基本恢复至冻结前水平。冻结期新绿洲农田未冻结水分含量的变化主要在0—140 cm土层,而老绿洲农田则主要在0—120 cm土层,且老绿洲农田土壤含水量显著高于新绿洲农田。

2.3.2 土壤温度时空动态变化过程

休耕期新、老绿洲农田各层土壤温度时空分布差异性不显著,随时间变化温度均呈现出先降低后升高的“V”字形变化趋势,且随土层深度的增大土壤温度逐渐降低(图6)。由土壤0℃等温线可大致推测土壤冻融情况,即2017年11月23日起新、老绿洲农田10 cm处土壤温度分别降至-0.94℃和-0.67℃,进入冻结阶段;11月23日至12月2日,由于气温回暖,土壤处于不稳定冻结阶段,冻结强度低;随着气温的逐渐降低,土壤的冻结深度逐渐加深,于翌年2月13日冻结深度达到最大,新、老绿洲

农田最大冻结深度分别为128 cm和133 cm(图6)。

2.4 土壤贮水量

2.4.1 玉米生育期土壤贮水量

2017年和2018年玉米生育期内两种农田土壤贮水量随时间变化均表现为先降低后升高趋势,于每年7月降至最低(表3、表4)。在相同灌溉处理下,新绿洲农田2017年和2018年玉米生育期内整个剖面月平均贮水量分别为291.26、312.55 mm,低于同年老绿洲农田26.5%和18.0%,但新绿洲农田140—180 cm土层贮水量分别为101.17 mm和112.65 mm,高于老绿洲农田21.15%和52.62%。

新绿洲农田土壤贮水量在同一月份不同土层深度间均表现出显著性差异($P<0.05$),老绿洲农田除7月和8月土层间土壤贮水量差异性不显著外,其余月份均表现出显著性差异($P<0.05$)。0—20 cm土层受灌水和降雨的影响较大,土壤贮水量变化较为明显,变化幅度较大,如2017年新绿洲农田土壤贮水量为24.02—39.50 mm,老绿洲农田则为33.44—44.43 mm。此外,2017年和2018年新绿洲农田160—180 cm土层贮水量均值显著高于其他土层($P<0.05$),而

表3 2017年玉米生育期土壤贮水量(单位:mm)

Table 3 Soil water storage during growth period in 2017 (unit:mm)

农田	土层/cm	4月	5月	6月	7月	8月	9月
新绿洲农田	0—20	39.50±0.91 ^c	35.39±1.35 ^{cd}	29.33±0.67 ^{cd}	24.02±1.20 ^{cd}	31.43±1.76 ^{bc}	30.47±2.12 ^{cd}
	20—40	30.51±8.31 ^{de}	28.82±5.62 ^c	19.64±1.66 ^c	9.80±8.89 ^d	17.61±15.91 ^d	19.12±17.39 ^d
	40—60	24.59±2.22 ^c	27.82±1.62 ^c	20.84±1.28 ^c	13.08±0.89 ^d	15.01±13.02 ^d	24.08±1.72 ^{cd}
	60—80	27.97±0.73 ^{de}	33.51±2.71 ^{de}	24.98±6.31 ^{de}	29.26±9.79 ^{bc}	26.96±1.48 ^{cd}	32.84±5.71 ^c
	80—100	26.83±1.90 ^c	31.07±0.85 ^{de}	26.48±0.95 ^{de}	18.92±6.24 ^{cd}	21.49±4.30 ^{cd}	25.87±0.27 ^{cd}
	100—120	33.56±1.90 ^{cd}	35.14±1.61 ^{cd}	31.55±2.55 ^{cd}	19.90±2.20 ^{cd}	24.56±2.24 ^{cd}	30.32±1.56 ^{cd}
	120—140	38.18±1.81 ^{cd}	38.21±1.61 ^c	36.93±2.70 ^c	24.80±3.08 ^{cd}	26.16±2.95 ^{cd}	33.97±1.65 ^{bc}
	140—160	49.25±4.14 ^b	49.24±4.11 ^b	48.68±4.97 ^b	34.44±1.71 ^{ab}	33.30±2.67 ^{ab}	44.92±2.56 ^b
老绿洲农田	160—180	65.41±3.53 ^a	66.73±4.43 ^a	67.09±4.48 ^a	44.46±6.42 ^a	41.49±6.42 ^a	62.02±4.23 ^a
	0—20	41.04±5.56 ^b	44.43±7.33 ^b	43.69±7.6 ^{ab}	33.44±6.79 ^b	37.16±3.96 ^a	35.71±5.15 ^b
	20—40	45.07±6.08 ^b	46.84±7.80 ^b	44.59±6.27 ^{ab}	32.85±3.13 ^b	37.82±4.29 ^a	39.07±7.89 ^{ab}
	40—60	50.12±5.87 ^a	55.27±7.50 ^{ab}	52.15±7.23 ^{ab}	37.39±5.49 ^b	42.23±4.30 ^a	47.56±9.18 ^{ab}
	60—80	49.78±1.10 ^{ab}	55.10±1.88 ^{ab}	52.08±1.48 ^{ab}	38.86±2.10 ^b	41.39±1.28 ^a	48.74±1.83 ^{ab}
	80—100	48.51±3.66 ^{ab}	52.89±2.90 ^{ab}	52.24±4.55 ^{ab}	38.90±3.64 ^b	39.31±2.31 ^a	46.69±1.07 ^{ab}
	100—120	49.87±7.37 ^{ab}	52.97±7.01 ^{ab}	52.33±6.67 ^{ab}	43.61±9.05 ^{ab}	42.33±8.65 ^a	45.94±6.77 ^{ab}
	120—140	46.99±7.20 ^{ab}	47.96±7.71 ^b	48.39±8.54 ^{ab}	39.20±12.48 ^b	36.81±9.34 ^a	39.93±6.25 ^{ab}
	140—160	48.43±4.08 ^{ab}	52.96±4.29 ^{ab}	55.06±3.77 ^a	49.95±14.70 ^{ab}	37.72±7.42 ^a	41.81±6.32 ^{ab}
	160—180	35.36±11.12 ^b	37.03±12.95 ^b	38.38±14.08 ^b	30.90±16.94 ^b	23.02±12.56 ^a	50.42±11.77 ^a

对于每种农田, $P<0.05$,同一列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

表4 2018年玉米生育期土壤贮水量(单位:mm)
Table 4 Soil water storage during growth period in 2018 (unit:mm)

农田	土层/cm	4月	5月	6月	7月	8月	9月
新绿洲农田	0—20	38.24±3.14 ^c	34.02±2.40 ^d	25.34±1.63 ^c	28.60±1.48 ^{cd}	31.62±0.92 ^c	39.67±0.09 ^c
	20—40	27.24±1.22 ^g	24.13±0.07 ^f	17.84±0.30 ^f	20.50±0.07 ^e	23.66±1.47 ^f	24.32±4.41 ^{ef}
	40—60	30.24±1.00 ^f	24.13±2.12 ^f	18.06±2.52 ^f	19.10±2.12 ^e	22.76±0.40 ^f	21.13±0.99 ^f
	60—80	36.24±0.38 ^{cd}	32.58±0.05 ^d	27.47±0.51 ^{de}	26.64±0.05 ^d	30.25±3.51 ^{cd}	28.69±3.99 ^{de}
	80—100	32.24±0.36 ^{ef}	28.98±0.65 ^e	25.91±1.09 ^e	20.75±0.65 ^e	25.41±2.17 ^{ef}	24.80±2.71 ^{ef}
	100—120	34.24±1.03 ^{de}	32.57±1.01 ^d	31.30±0.42 ^d	26.27±1.01 ^d	27.78±2.34 ^{de}	26.26±1.71 ^{ef}
	120—140	38.24±0.61 ^c	37.79±0.15 ^c	37.40±1.42 ^c	31.78±0.15 ^c	32.18±2.78 ^c	33.01±4.20 ^d
	140—160	49.24±1.78 ^b	49.41±0.54 ^b	51.55±6.30 ^b	43.09±0.54 ^b	44.14±0.92 ^b	44.95±2.89 ^b
	160—180	68.24±1.05 ^a	65.21±0.42 ^a	66.20±0.05 ^a	64.97±0.42 ^a	66.82±1.20 ^a	62.10±0.88 ^a
老绿洲农田	0—20	46.84±1.70 ^a	40.98±1.04 ^{ab}	33.25±0.83 ^{ab}	30.41±0.68 ^a	32.47±1.20 ^{ab}	32.74±3.50 ^b
	20—40	47.62±2.51 ^a	46.10±3.49 ^{ab}	39.95±2.95 ^{ab}	34.26±2.32 ^a	36.32±3.18 ^{ab}	36.90±2.70 ^{ab}
	40—60	50.73±3.04 ^a	52.51±3.61 ^a	49.82±3.06 ^a	42.74±1.86 ^a	45.32±3.40 ^a	44.52±3.30 ^{ab}
	60—80	47.24±0.12 ^a	49.96±1.05 ^{ab}	49.10±1.44 ^a	42.34±2.36 ^a	43.93±3.03 ^a	43.88±3.70 ^{ab}
	80—100	44.90±3.02 ^a	47.96±3.87 ^{ab}	48.44±3.78 ^{ab}	42.65±4.97 ^a	43.38±5.40 ^a	43.32±5.70 ^{ab}
	100—120	45.43±7.52 ^a	47.39±7.12 ^{ab}	49.71±6.52 ^a	45.65±8.47 ^a	44.89±8.89 ^a	45.34±8.90 ^a
	120—140	43.35±4.66 ^a	44.27±3.39 ^{ab}	47.65±1.90 ^{ab}	46.84±6.80 ^a	46.63±8.20 ^a	46.86±7.60 ^a
	140—160	26.36±23.30 ^a	26.79±23.70 ^b	29.85±26.14 ^b	29.49±25.90 ^a	39.78±7.87 ^{ab}	38.62±9.40 ^{ab}
	160—180	30.10±26.27 ^a	30.14±26.29 ^{ab}	49.46±5.39 ^a	48.13±4.18 ^a	47.31±4.31 ^a	46.83±4.50 ^a

对于每种农田,同一列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

老绿洲农田在该层土壤的贮水量显著低于其他土层或与其他土层差异性不显著(7月和8月)。

2.4.2 休耕期土壤贮水量

受秋季灌溉影响,休耕期新、老绿洲农田土壤贮水量逐渐升高(表5),于2017年11月贮水量升至最高,分别为329.9 mm和394.8 mm,进入土壤冻结期后贮水量逐渐降低,于翌年2月降至最低,土壤融化后贮水量逐渐升高,分别为303.1 mm和361.6 mm,相比冻结前分别降低了8.1%和8.4%。

除11月外,新、老绿洲农田土壤贮水量在不同土层间均表现出显著性差异($P<0.05$,表5)。休耕期内,0—40 cm土层水分随时间变化的幅度最大,由于该层土壤受大气影响较大,土壤未冻结水含量维持在相对较低水平,两种农田土壤贮水量均于1月达最低水平,4月土壤完全融化后基本恢复至冻结前水平。土壤融化后新、老绿洲农田浅层土壤贮水量分别比11月降低了3.7%和6.7%。40—100 cm土层是土壤完全冻结区和未冻结区域的过渡带,该层土壤受大气环境的影响减弱,土壤未冻结水含量

随深度的增加而增大。新、老绿洲100—200 cm土层的贮水量随时间变化保持在相对稳定的状态。

2.5 深层渗漏量及 $\text{NO}_3\text{-N}$ 淋溶量

2.5.1 玉米生育期深层渗漏量及 $\text{NO}_3\text{-N}$ 淋溶量

2017年玉米新绿洲农田除首次灌溉后有水分渗漏现象外,其余7次灌水后均无水分渗漏,老绿洲农田在整个生育期内无水分渗漏现象发生;2018年玉米生育期新绿洲农田前两次灌溉后均有水分渗漏现象,其余6次灌溉后均无水分渗漏,老绿洲农田与2017年生育期相似,无水分渗漏(图7)。2017年玉米苗期—拔节期灌溉后新绿洲农田有水分渗漏,灌溉22 h后水分平均渗漏量为4.72 mm,灌水48 h后水分渗漏量最大,之后逐渐减小,直至灌水263 h后(6月3日)水分渗漏结束,渗漏累积量为46.97 mm(图7A),占灌水定额(90 mm)的52.19%。2018年两次灌溉后水分渗漏历时分别为750 h和303 h,水分渗漏量分别为63.3 mm和41.8 mm,水分渗漏累积曲线随时间变化逐渐变缓(图7B、图7C)。

表 5 2017 年休耕期土壤贮水量(单位:mm)
Table 5 Soil water storage during fallow period in 2017 (unit:mm)

农田	土层/cm	10月	11月	12月	1月	2月	3月
新绿洲农田	0—20	29.90±2.33 ^c	35.9±0.77 ^a	20.62±1.59 ^b	18.68±2.09 ^{bc}	21.05±1.89 ^d	37.41±2.91 ^{cd}
	20—40	27.82±4.67 ^c	32.4±6.80 ^a	20.12±3.07 ^b	16.03±2.53 ^c	16.22±2.64 ^d	28.59±6.74 ^d
	40—60	29.40±10.09 ^c	33.0±10.63 ^a	26.26±3.93 ^{ab}	17.27±0.67 ^c	17.05±0.98 ^d	35.38±4.03 ^{cd}
	60—80	28.58±1.26 ^c	32.5±2.43 ^a	32.16±2.54 ^{ab}	20.78±2.16 ^{bc}	17.86±2.02 ^d	28.85±2.23 ^d
	80—100	26.41±1.22 ^c	30.3±0.31 ^a	31.05±0.26 ^{ab}	22.80±0.39 ^{bc}	18.38±1.40 ^d	27.92±1.14 ^d
	100—120	30.24±1.50 ^c	34.0±1.30 ^a	35.06±1.42 ^{ab}	34.91±1.77 ^{bc}	20.63±1.65 ^d	31.08±2.47 ^{cd}
	120—140	33.55±1.84 ^c	38.7±1.70 ^a	40.02±1.60 ^{ab}	40.54±1.66 ^{bc}	37.71±2.33 ^c	39.71±1.36 ^c
	140—160	43.86±2.46 ^b	49.8±3.49 ^a	51.43±3.61 ^a	51.94±3.64 ^a	48.46±3.23 ^b	50.69±3.70 ^b
	160—180	61.26±5.69 ^a	43.3±37.73 ^a	44.34±38.53 ^{ab}	44.58±8.74 ^{ab}	65.63±4.78 ^a	66.64±3.96 ^a
老绿洲农田	0—20	32.55±1.10 ^{ab}	44.0±5.04 ^a	27.71±4.20 ^b	24.07±2.18 ^b	25.82±1.52 ^b	40.84±1.15 ^d
	20—40	36.52±4.79 ^{ab}	45.3±5.52 ^a	39.92±5.48 ^a	29.86±2.70 ^b	28.95±1.69 ^b	42.78±3.69 ^{cd}
	40—60	13.45±3.29 ^c	47.5±2.99 ^a	47.49±2.88 ^a	39.20±5.14 ^a	34.03±3.52 ^a	45.48±2.34 ^{cd}
	60—80	41.25±0.58 ^a	44.8±1.03 ^a	46.12±0.38 ^a	42.61±2.22 ^a	34.39±2.04 ^a	44.30±0.48 ^{cd}
	80—100	41.26±3.62 ^a	42.9±2.69 ^a	44.42±2.83 ^a	43.72±3.42 ^a	37.51±4.74 ^a	43.23±3.25 ^{bc}
	100—120	44.09±7.64 ^a	44.6±7.50 ^a	45.86±7.25 ^a	46.13±7.35 ^a	44.84±7.70 ^a	45.10±7.71 ^a
	120—140	42.16±5.35 ^a	42.6±5.20 ^a	43.67±4.79 ^a	44.28±4.55 ^a	44.15±4.90 ^a	43.55±4.91 ^a
	140—160	17.07±4.14 ^{bc}	38.8±6.43 ^a	39.63±6.51 ^a	40.16±6.58 ^a	40.12±6.41 ^a	39.71±6.40 ^{ab}
	160—180	45.48±3.96 ^a	44.3±4.57 ^a	44.98±4.77 ^a	45.44±4.82 ^a	45.66±4.86 ^a	45.33±4.74 ^a

对于每一种农田,同一列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

2018 年玉米生育期新绿洲农田水分渗漏量为 105.1 mm,占灌水总量(720 mm)的 14.6%。

2017 年和 2018 年玉米生育期内收集到的 90% 土柱淋溶液样品中 NO_3^- -N 的质量浓度大于 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,部分样品 NO_3^- -N 浓度高达 $220 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。 NO_3^- -N 淋溶累积曲线与水分渗漏曲线变化相一致,2017 年玉米生育期内 NO_3^- -N 淋溶累积量为 $39 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;2018 年 4 月和 5 月 NO_3^- -N 淋溶量分别为 $50.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $17.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,玉米生育期内 NO_3^- -N 淋溶总量为 $68.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

2.5.2 休耕期深层渗漏量及 NO_3^- -N 淋溶量

2017 年秋灌(10 月 15 日)后老绿洲农田无水分淋失现象,而新绿洲农田灌溉 22 h 后水分淋失量为 5.28 mm,162 h 后水分淋失结束,淋失总量为 50.68 mm, NO_3^- -N 淋失量为 $84.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (图 8)。2018 年秋灌(11 月 5 日)后新、老绿洲均无水分渗漏现象。

3 讨论

农田土壤 NO_3^- -N 淋溶损失是一个复杂的物理

化学过程,该淋失过程受多种因素影响。当施氮量远高于作物生长需氮量时,土壤中将会残留大量氮素;灌溉或降水可改变土壤水分条件,致使土壤中残留氮素随灌溉水下渗而下移,引起氮素的淋失。中国北方干旱区降水量小、蒸发量大,灌溉是引起 NO_3^- -N 淋失的主要原因。本研究发现,灌水定额均为 90 mm 时,老绿洲农田在 2017 年和 2018 年玉米生育期内无水分渗漏,新绿洲农田易在玉米苗期—拔节期发生深层土壤水分渗漏现象。2017 年玉米播种时新、老绿洲农田土壤初始含水率分别为 $0.19 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $0.22 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$,土壤水分状况充足,不影响玉米出苗,在玉米苗期—拔节期灌水一次,致使 200 cm 土层土壤水分渗漏 46.97 mm,占灌水定额的 52.2%,占年灌水量的 6.5%,淋溶液中氮素主要以 NO_3^- -N 形式淋失, NO_3^- -N 淋失量为 $39 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;2018 年玉米播种时新、老绿洲农田土壤初始含水率分别为 $0.15 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $0.19 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$,为保证玉米正常出苗需播种后进行灌溉,在玉米播种—拔节期灌水两次,水分渗漏量分别为 63.3 mm 和 41.8 mm,分别占灌水

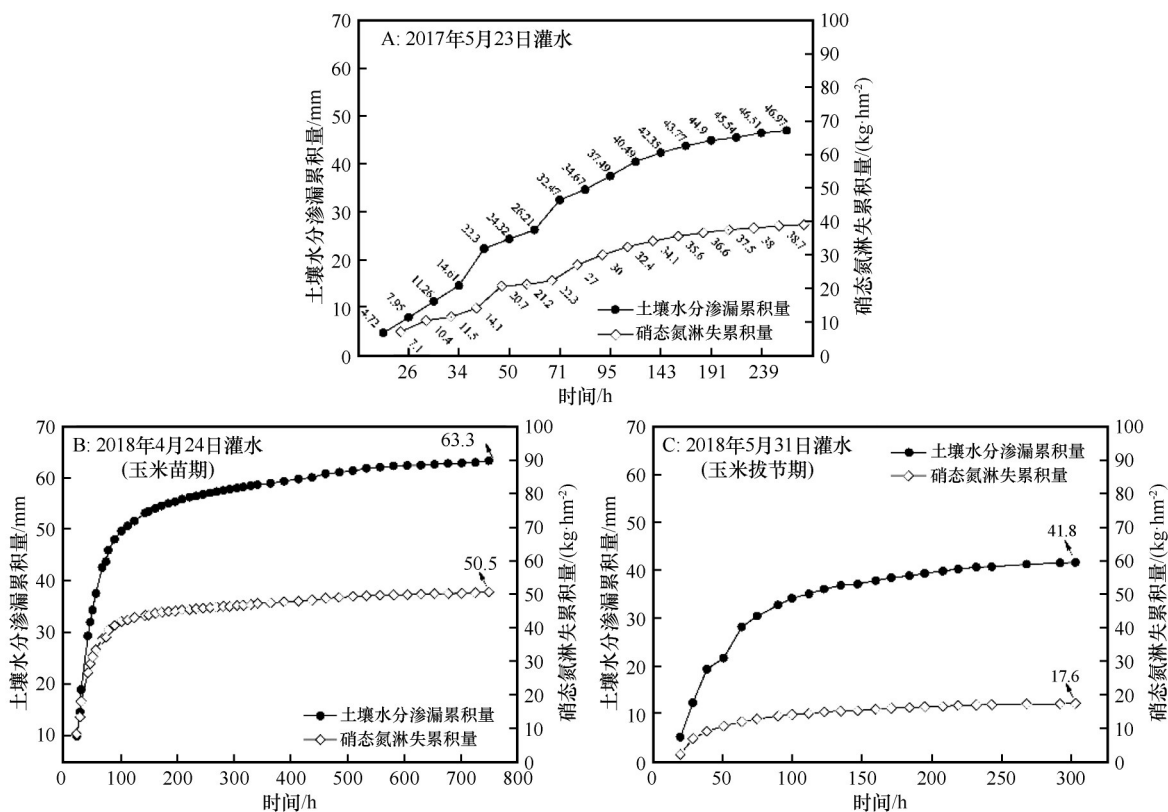


图7 2017年(A)和2018年(B)玉米生育期内新绿洲农田土壤水分渗漏量和 NO_3^- -N淋溶量

Fig.7 The accumulation of water leakage and nitrate leaching during maize growth period of newly cultivated sandy cropland in 2017 and 2018

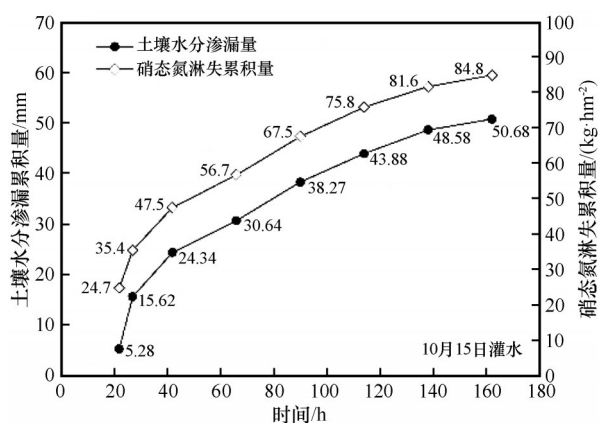


图8 2017年休耕期新绿洲农田土壤水分渗漏量和 NO_3^- -N淋溶量

Fig.8 The accumulation of water leakage and nitrate leaching during fallow period of newly cultivated sandy cropland in 2017

定额的70.3%和46.4%,2018年玉米生育期水分渗漏损失量占年灌水量的14.5%,同时,伴随水分渗漏 NO_3^- -N淋失量分别为 $50.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $17.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, NO_3^- -N淋失量呈下降趋势。苏永中等^[14]根据水量平衡方程粗略估算出,该研究区域在充分灌溉条件

下,沙土农田玉米生育期内灌溉水通过深层渗漏损失量近50%,沙壤土深层渗漏损失量在15%左右(玉米的蒸散量为591—670 mm)。本研究两年的结果表明,在非充分灌溉条件下(灌溉定额90 mm),新绿洲农田灌溉水深层渗漏损失6.5%—14.5%,老绿洲农田无水分损失情况。同时也发现,春季4、5月玉米苗期至拔节前期灌水容易引发深层渗漏现象。这是因为玉米播种至拔节期植株生长缓慢,蒸腾速率较小,耗水量也较小^[17],该阶段灌溉水主要在重力作用下向下运移,深层土壤水分达饱和状态时渗漏出200 cm土层。玉米拔节期至乳熟期正值河西走廊荒漠绿洲区6—8月,气温较高、蒸发量较大,并且植株生长旺盛并伴有玉米营养生长,是玉米耗水高峰期^[18],玉米根层土壤水分迅速消耗促使深层水分上移,深层土壤含水量降低呈不饱和状态,无重力水向下渗漏;玉米乳熟期至完熟期的耗水量趋于下降,灌溉频率也随之减少,深层土壤水分呈升高趋势,但仍未达到土壤饱和状态,因此也无重力水渗漏。

休耕期灌水也可致使新绿洲农田土壤水分深

层渗漏及 NO_3^- -N淋失。如2017年秋灌致使新绿洲农田渗漏量为50.68 mm,占灌水定额的56.3%;伴随水分渗漏的 NO_3^- -N淋失量达 $84.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,是同年生育期内 NO_3^- -N淋失量的2.2倍。2018年11月5日进行冬灌处理,由于冬灌时期很有可能处于土壤冻结临界状态,灌溉水被冻结以固态形式存在,截至2019年2月底,新、老绿洲均无水分渗漏现象。2017年和2018年水分渗漏损失总量分别为97.65 mm和105.1 mm,占灌溉水总量(810 mm)的12%和13%, NO_3^- -N淋溶损失总量分别为 $123.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $68.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,占年施氮总量的34.2%和18.7%。本研究结果显示,灌溉显著增加了新绿洲农田土壤水分的深层渗漏和 NO_3^- -N淋失的风险, NO_3^- -N随水分深层渗漏主要发生在玉米耗水较少的苗期—拔节期以及休耕期,而 NO_3^- -N淋失高峰主要发生在休耕期,这很有可能是休耕期灌水使得玉米生育期内未被作物吸收利用的氮肥随水分深层渗漏淋失,因而 NO_3^- -N淋溶量较高。杨荣^[19]在同一研究区的研究结果表明,冬灌定额150—200 mm的漫灌容易引起深层渗漏,并极有可能将土壤中残留的 NO_3^- -N通过深层渗漏淋溶至地下水,诱发地下水硝酸盐污染,对农业生态环境和人类健康造成一定危害。

土壤质地是引起灌溉水渗漏及 NO_3^- -N淋失差异的主要原因,土壤砂粒含量越高,持水性能越差,水分渗漏量和氮素淋溶量也越大。相反,土壤黏粒因其比表面积大和吸附性强而有利于水分的贮存^[20]。因此,土壤黏粒含量是决定土壤持水性能的主要因素,影响水分在土壤中的迁移和再分布及滞留时间^[21-22]。荒漠绿洲化进程中,开垦年限较长的老绿洲农田土壤有较高的黏粒含量和有机质含量^[23],而新开垦沙地农田土壤为沙土,有机质含量极低^[15]。因此,在本研究中,新、老绿洲农田土壤水分渗漏及水分时空分布存在显著性差异,老绿洲农田土壤“蓄水保墒”及抑制水分和 NO_3^- -N渗漏淋失的生态效应明显优于开垦年限较短的新垦绿洲农田。

苏永中等^[24]的研究显示,土壤细粒组分(黏粉粒)与土壤田间持水量、土壤有机质含量呈极显著正相关关系。老绿洲农田土壤(灌耕灰棕漠土)黏粒含量高,对水分子束缚力较大,吸附在土颗粒上的强结合水较多,土壤贮水量显著高于新垦绿洲农田(灌耕风沙土)。杨荣^[19]的研究表明,冬灌后(灌水定额为150 mm)边缘绿洲新垦沙地农田140—160 cm和240—300 cm土层土壤含水量显著增加,

而旱耕农田(老绿洲农田)0—100 cm土层土壤含水量增加较为明显,100—200 cm土层则变化较小;随着冬灌灌水量的增大,新垦绿洲农田较老绿洲农田易发生深层渗漏和 NO_3^- -N淋溶,引起地下水 NO_3^- -N污染,进一步印证了冬灌对于新垦绿洲农田“蓄水保墒”作用效果并不明显。本研究显示,玉米生育期内新绿洲农田0—140 cm土层水分变化较为明显,土壤贮水量显著低于老绿洲农田,但160—180 cm土层贮水量却高于老绿洲农田。休耕期新绿洲农田0—140 cm深度范围内土壤未冻结水含量变化幅度较大,老绿洲农田则在0—120 cm范围内变化,且老绿洲农田土壤含水量显著高于新绿洲农田。尽管土壤融化后新绿洲农田浅层(0—40 cm)土壤贮水量损失量(3.7%)低于老绿洲农田(6.7%),但土壤贮水量仍低于老绿洲农田(21%),因此,新绿洲农田需考虑适当补充灌溉以保证春播作物正常出苗。

综上所述,黑河中游荒漠绿洲过渡带不同开垦年限的农田土壤水分时空变化、深层渗漏及 NO_3^- -N淋溶损失对灌溉的响应不同。新绿洲农田有近20年的耕种历史,耕作层土壤有机质和养分含量有一定的积累,但土壤砂粒含量高、有机质含量低、持水性能差是其主要特征,而老绿洲农田由于长期的农业耕作导致土壤结构与肥力水平逐渐改善,其“蓄水保墒”的生态效应优于新绿洲农田。此外,玉米苗期—拔节期以及休耕期灌水对于新绿洲农田而言,是深层渗漏及氮淋溶损失的高发期,容易造成水资源浪费和地下水硝酸盐污染。鉴于以上分析,建议新绿洲农田春季灌溉时降低灌水定额或减少灌水次数、减少冬灌灌水定额或免冬灌,以此保证灌溉水资源的优化利用并减少农田氮素的淋失。针对土壤质地差异实施动态的冬灌策略以及改善土壤结构,培肥土壤是干旱区水土资源开发、生态与环境保护与协调的有效途径,也将成为今后的研究重点。

4 结论

在灌溉时间和灌溉定额一致的情况下,干旱区绿洲农田中开垦年限较长的老绿洲农田抑制水分和 NO_3^- -N渗漏淋失的生态效应优于开垦年限较短的新绿洲农田。新绿洲农田土壤贮水量显著低于老绿洲农田,且新绿洲农田更容易发生水分深层渗漏及 NO_3^- -N淋失。新绿洲农田灌溉水的深层渗漏损失量达到了97.7—105.1 mm,占年灌溉水总量的

12%—13%, $\text{NO}_3\text{-N}$ 淋溶损失量为 $68.1\text{—}123.8\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 占年施氮总量的 18.7%—34.2%。玉米生育期内绿洲农田 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的淋溶损失主要发生在苗期—拔节期, 拔节期至完熟期 $\text{NO}_3\text{-N}$ 深层淋失量明显减少。此外, 休耕期灌水极易将生育期土壤中积累的氮素淋溶至深层, 从而导致 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的淋失达到高峰。休耕期 $\text{NO}_3\text{-N}$ 淋失量为 $84.8\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 是当年生育期内 $\text{NO}_3\text{-N}$ 淋失量的 2.2 倍。因此, 建议冬灌时降低灌溉定额或免冬灌以此保证灌溉水资源的优化利用和减少农田氮素的淋失。另外, 应针对荒漠绿洲过渡带土壤质地差异, 实施动态灌溉策略, 且应适当减少春季灌溉次数或降低灌水定额以降低生育期内 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的淋失风险。

参考文献:

- [1] Beaudoin N, Saad J K, Van Laethem C, et al. Nitrate leaching in intensive agriculture in Northern France: effect of farming practices, soils and crop rotations [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, 111(1): 292–310.
- [2] Thompson R B, Martínez-Gaitan C, Gallardo M, et al. Identification of irrigation and N management practices that contribute to nitrate leaching loss from an intensive vegetable production system by use of a comprehensive survey [J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 89(3): 261–274.
- [3] Velthof G L, Lesschen J P, Webb J, et al. The impact of the Nitrates Directive on nitrogen emissions from agriculture in the EU-27 during 2000–2008 [J]. *Science of the Total Environment*, 2014(15): 1225–1233.
- [4] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, et al. Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions [J]. *Science*, 2008, 320: 889–892.
- [5] Azusa O, Arunima M, Keiichiro K, et al. Substantial nitrogen pollution embedded in international trade [J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(3): 1–5.
- [6] Fan J, Hao M, Malhi S S. Accumulation of nitrate N in the soil profile and its implications for the environment under dryland agriculture in northern China: a review [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2010, 90(3): 429–440.
- [7] Young M H, Wierenga P J, Mancino C F. Large weighing lysimeters for water use and deep percolation studies [J]. *Soil Science*, 1996, 161(8): 491–501.
- [8] Li X X, Hu C H, Jorge A Delgado, et al. Increased nitrogen use efficiencies as a key mitigation alternative to reduce nitrate leaching in north china plain [J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 89(1): 137–147.
- [9] Yang X L, Lu Y L, Tong Y A, et al. A 5-year lysimeter monitoring of nitrate leaching from wheat-maize rotation system: comparison between optimum N fertilization and conventional farmer N fertilization [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 199(1): 34–42.
- [10] 任理, 袁福生, 张福锁. 冬小麦生长条件下土壤硝态氮淋洗的传递函数模拟和预报 [J]. *生态学报*, 2004, 24(10): 2281–2288.
- [11] Su Y Z, Yang R, Liu W J, et al. Evolution of soil structure and fertility after conversion of native sandy desert soil to irrigated cropland in arid region, China [J]. *Soil Science*, 2010, 175(5): 246–254.
- [12] 苏永中, 张珂, 刘婷娜, 等. 河西边缘绿洲荒漠沙地开垦后土壤性状演变及土壤碳积累研究 [J]. *中国农业科学*, 2017, 50(9): 1646–1654.
- [13] 王雪峰, 苏永中, 杨荣. 黑河中游绿洲不同开垦年限农田土壤线虫群落特征 [J]. *应用生态学报*, 2010, 21(8): 2125–2131.
- [14] 苏永中, 杨荣, 刘文杰, 等. 基于土壤条件的边缘绿洲典型灌区灌溉需水研究 [J]. *中国农业科学*, 2014, 47(6): 1128–1139.
- [15] 苏永中, 王芳, 张智慧, 等. 河西走廊中段边缘绿洲农田土壤性状与团聚体特征 [J]. *中国农业科学*, 2007, 40(4): 741–748.
- [16] 刘淑珍, 高伟达, 任图生. 利用最小水分限制范围评价东北黑土区免耕和垄作的土壤水分稳定性 [J]. *农业工程学报*, 2020, 36(10): 107–115.
- [17] 赵丽雯. 河西荒漠绿洲农田玉米蒸腾过程多尺度观测研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [18] 聂文果, 张昉明, 徐先英, 等. 玉米茎流速率及耗水量研究 [J]. *中国农学通报*, 2009, 25(7): 230–234.
- [19] 杨荣. 荒漠绿洲沙质土壤硝态氮淋溶及其调控研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2009.
- [20] Nguyen Phuong M, Pue J D, Khoa L V, et al. Impact of regression methods on improved effects of soil structure on soil water retention estimates [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 525(4): 598–606.
- [21] 李王成, 冯绍元, 康绍忠, 等. 石羊河中游荒漠绿洲区土壤水分的分布特征 [J]. *水土保持学报*, 2007, 21(3): 138–143.
- [22] Holland J E, Biswas A. Predicting the mobile water content of vineyard soils in New South Wales, Australia [J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 148(148): 34–42.
- [23] 刘秀位, 苗文芳, 王艳哲, 等. 冬前不同管理措施对土壤温度和冬小麦早期生长的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(9): 1135–1141.
- [24] 苏永中, 杨晓, 杨荣. 黑河中游边缘荒漠-绿洲非饱和带土壤质地对土壤氮积累与地下水氮污染的影响 [J]. *环境科学*, 2014, (10): 3683–3691.

Soil hydrothermal dynamics and nitrate leaching characteristics in farmland in desert oasis

Li Jing^{1,2}, He Zhibin², Wang Jianbing¹, Ma Dengke^{2,3}, Wang Lisha^{2,3}

(1. *Gansu Academy of Social Sciences, Lanzhou 730070, China*; 2. *Linze Inland River Basin Research / Key Laboratory of Inland River Basin Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resource, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*; 3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Irrigation and nitrogen fertilizer application are the key measures to ensure farmland production in arid desert areas, but excessive nitrogen fertilizer will leach into deep soil or groundwater, resulting in nitrogen loss and groundwater pollution. In this study, two kinds of farmland soils with different reclamation years in the desert oasis transition zone in the middle reaches of Heihe River were taken as the research objects. Through soil column simulation experiment, the dynamic changes of soil moisture and temperature and the leaching law of nitrate nitrogen in maize growth period and leisure period were monitored and analyzed, and the differences of nitrate nitrogen loss in farmland soils with different cultivation years were revealed. The results showed that the soil water leakage and nitrate leaching of Newly cultivated sandy cropland mainly occurred in the seedling stage to elongation stage and the fallow stage. The annual loss of deep leakage ranged from 97.65 mm to 105.1 mm, accounting for 12%–13% of the total annual irrigation water (810 mm). The annual loss of NO_3^- -N leaching ranged from 68.1 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ to 123.8 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, accounting for 18.7%–34.2% of the total annual nitrogen application. Irrigation in fallow period led to the accumulation of a large amount of nitrogen leaching in the soil during the growth period, and the NO_3^- -N leaching loss was 2.2 times of that in the current growth period. Under the same irrigation and fertilization conditions, there were no deep seepage and NO_3^- -N leaching occurred in the old oasis farmland. Moreover, the “water preservation” effect of old oasis farmland was better than newly cultivated sandy cropland. Therefore, we suggested that reduce the irrigation frequency or irrigation quota in spring during the growing period of newly cultivated sandy farmland, and reduce irrigation quota or no winter irrigation in winter fallow period, so as to ensure the optimal utilization of irrigation water resources and reduce nitrogen leaching loss in farmland.

Key words: oasis farmland; moisture content; temperature; nitrate nitrogen; leakage; leaching