文章编号: 1672 - 3317 (2023) 12 - 0172 - 09

豫东农田耕层土壤盐分运移特征及影响因素分析

任 文^{1,2}, 丁大伟^{1,2,3}, 刘安能^{1,2}, 陈金平^{1,2}, 雍蓓蓓^{1,2},

刘春成¹, 郭成士^{1,2}, 张志新⁴, 谢 坤^{1,2*}, 李中阳^{1,2*}

(1.中国农业科学院农田灌溉研究所,河南新乡453002;2.河南商丘农田生态系统国家野外科学观测研究站/国家农业环境商丘观测实验站/国家农业绿色发展长期固定观测商丘试验站,河南商丘476000;
 3.中国农业科学院研究生院,北京100081;4.西北农林科技大学草业与草原学院,陕西杨凌712100)

摘 要:【目的】探究农田生态系统耕层土壤盐分运移特征及其与水环境关系。【方法】于 2010—2020 年对河南商丘 固定区域内农田生态系统土壤、浅层地下水及流动地表水盐分特征进行观测,采用描述性统计及 Piper 图分析方法, 研究观测区域中土壤及水体盐分特征长期变化规律及内在联系。【结果】降水量增加是引发耕层土壤(0~20 cm)盐 分离子升高的重要原因。耕层土壤电导率最大值通常出现在 10—11 月,其与 8 月降水量的线性拟合效果最佳(拟合 式为 y=0.794 3x+126.65, R²为 0.6313, P<0.05)。2020 年耕层土壤(0~20 cm)、浅层土壤(0~100 cm)及浅层地 下水中 Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、HCO₃、SO₄²⁻、CI及土壤电导率显著高于 2015 年(P<0.05)。同时,2020 年耕层土壤浸 出液、浅层地下水及流动地表水水化学类型表现出高度相似性,表明耕层土壤与水体可溶性盐离子存在密切联系。 【结论】豫东地区典型农田生态系统降水量、地下水位与 10 月的耕层及浅层土壤电导率表现为正向关系,且耕层土 壤是水体可溶性盐离子的重要来源。

关 键 词: 盐分迁移; 土壤可溶性盐; 土壤电导率; 耕层土壤; 水环境 中图分类号: S271 文献标志码: A doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023003



任文, 丁大伟, 刘安能, 等. 豫东农田耕层土壤盐分运移特征及影响因素分析[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(12): 172-180. REN Wen, DING Dawei, LIU Anneng, et al. Migration of Salt in Plough Layer and Its Determinants in Farmlands in Eastern Henan Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(12): 172-180.

0引言

【研究意义】豫东地区是我国重要的粮食产区, 玉米和小麦是该区域内的主要粮食作物,豫东地区的 粮食综合生产能力位于我国前列^[1],但该地区是土壤 次生盐碱化的高发、易发区域^[2-3]。因此,探究豫东 农田土壤盐分迁移规律及影响因素对保障该区域粮 食安全具有重要意义。

【研究进展】土壤盐分是评定土壤质量的重要标 准之一,当土壤盐分较高时不利于植物生长发育而导 致作物减产^[4]。如何有效预测土壤盐分变化规律对农 业生产意义重大。高彦花^[5]在渤海湾盐碱地区的研究 中发现电导率及 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻、Cl⁻、 HCO₃⁻量在 8—10 月之间变化最大,且 0~20 cm 土层

©《灌溉排水学报》编辑部,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

172

内土壤含盐量最高。所以探究土壤中最大电导率的出 现时间及土层可能是减少监测成本及预防次生盐碱 化的有效途径之一。耕层土壤易受农业生产活动及外 界自然因素的影响,其水分物理特性及盐分变化较为 明显,同时耕层土壤作物根系分布最为密集,耕层土 壤环境是影响作物最终产量的重要因素^[6]。耕层土壤 盐分通常与地下水埋深、降水量息息相关,降水量或 灌水量增加会促进耕层土壤盐分向下迁移^[7],地下水 埋深较低时易导致地下水矿化增加,当无合理的排水 措施便会导致土壤次生盐碱化^[8-9],而地下水埋深增 加同样会导致耕层土壤盐分降低[10]。土壤中离子分布 特性不同(如 K^+ 主要分布在 $0\sim40$ cm 土层内^[11], SO_4^{2-} 、 Cl⁻主要集中在 50 cm 以内的土壤中^[12]),具体表现 为离子迁移深度与降水时间密切相关,且随着土层深 度增加离子迁移能力可能会下降[13],因此明晰耕层土 壤中不同盐分离子运移过程及其与周边环境水体间 的关系可以更好揭示土壤盐分的变化规律。水分变化 对土壤盐分影响存在一定滞后性,如许璇等[14]研究表 明,地下水位变化对土壤盐分的影响具有滞后性。而 关共凑等[15]发现在最大降水量发生2个月后,土壤中 Ca²⁺、Mg²⁺流失量达到最大。【切入点】豫东平原粮 食主产区耕层土壤盐分与水分变化是否同样存在类

收稿日期: 2023-01-03 修回日期: 2023-05-05 基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1700900); 中国农科院基本 科研业务费专项院级统筹项目(Y2022LM29); 国家农业环境商丘观测实 验站(NAES038AE05); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (IFI2023-18); 河南省科技攻关项目(232102320332)

作者简介:任文(1994-),男,内蒙古集宁人。研究实习员,硕士研究生, 主要从事农田环境方向的研究工作。E-mail:renwen0116@foxmail.com 通信作者:李中阳(1980-),男,河南确山人。研究员,博士,主要从事 农业水资源与环境方面的研究。E-mail:lizhongyang1980@163.com 谢坤(1988-),男,河南永城人。助理研究员,硕士研究生,主要从事农 业水资源和环境方面的研究。E-mail:xiekun@caas.cn

似规律仍待探究。【拟解决的关键问题】本研究拟从 农田耕层土壤盐分在不同水分条件下的响应关系着 手,通过在豫东设立农田、水体盐分长期定位监测试 验,探究水环境变化对耕层土壤盐分迁移的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于河南省商丘市西北方向12km范围内, 该区域属半干旱、亚湿润暖温带季风气候,主要土壤 类型为黄河沉积物发育的潮土,并伴有部分盐土、碱 土、沙土和沼泽土的交错分布。区域平均海拔52m, 地貌类型为古黄河背河洼地、决口扇形地和河间微倾 斜平地,具有典型的黄河泛滥区特征,微地形略有起 伏,以地下水作为农业生产的主要灌溉水源。降水量、 地下水埋深存在明显季节性变化。

1.2 试验布置

以豫东平原小麦-玉米连作一年两熟农田作为样地,自2019年1月—2020年12月,于每月30日在朱楼(115°34′07″E、34°31′30″N)及关庄站区调查点(115°35′07″E、34°30′30″N),使用直径为7 cm 土钻,采用5点混合取样的方法采集0~20 cm 土层土样测定其土壤电导率,探究各月降水量、地下水埋深及土壤质量含水率对耕层土壤(0~20 cm)电导率的影响。于2010—2020年每年10月上旬^[16],在朱楼及关庄站区调查点采集0~20 cm 土层土壤测定其土壤电导率,探究研究区内耕层土壤电导率与水分条件特征参数间关系,评估该区土壤次生盐碱化风险。

选取降水量及地下水埋深存在显著差异年份 (2015、2020年)作为研究对象,于选定年份10月 上旬,采用 5 点混合取样的方法分别采集王庄 (115°36′03″E, 34°30′52″N)、朱楼、关庄、陈菜园 (115°32′38.4″E、34°31′17.6″N)及张大庄 (115°36′03″E、34°30′54″N)站区 0~20 cm 土层土壤, 同时使用专用取样水桶对各站点浅层地下水及对应 区域流动地表水(侯庄闸:115 34'23"E、34 31'59"N, 郑阁水渠: 115 32'43.4"E、34 33'45"N, 郑阁水库: 115 33'12"E、34 34'35"N,邓斌口:115 35'39.1"E、 34 29'39.1"N)进行取样,测定土壤、浅层地下水及 流动地表水中 Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺、Na⁺、HCO₃⁻、CO₃⁻、 SO4²⁻、CI⁻量,对比水分特征参数变化对耕层土壤盐 分运移的影响。此外,为进一步说明盐分在浅层土壤 中迁移规律,于2015年及2020年9-10月补充测定 研究区域内综合观测场(115°35′30.7″E, 34°31′15.3″N) 0~10、10~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm ± 层土壤电导率及 Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺、Na⁺、HCO₃⁻、CO₃²⁻、 SO_4^{2-} 、CI量,所有取样地点布置详见图 1。



图 1 商丘市农田土壤、水体取样地点布置图 Fig.1 Layout of agriculture soil and water sample collection sites in Shangqiu

1.3 指标测定及方法

1.3.1 降水量、地下水埋深、土壤质量含水率及土壤 电导率

气象数据由河南商丘农田生态系统国家野外科 学观测研究站(115°35′32″E、34°31′12″N)气象观测 场提供;2010年1月一2020年12月,每10天采用 钢尺水位计测定各取样地点浅层地下水埋深(m); 每10天用土钻采集各取样地点0~20 cm 耕层土壤, 使用烘干法测定土壤质量含水率。按照1:5 土水比 例制备土壤浸出液,然后参照《森林土壤水溶性盐分 分析》(GB/T 7871—1987)测定各取样地点取得样品 的电导率(25℃)。

1.3.2 土壤及地下水盐分离子

将各取样地点取得的土壤样品按照 1:5 土水比 例混合,之后振荡 3 min,测定可溶性盐离子量。此 外,浅层地下水及流动地表水样品需于 2 h 内放入冰 柜(-4 ℃)保存,以便后续测定各类可溶性盐离子量。 其中, Ca²⁺及 Mg²⁺采用 EDTA 滴定法 (GB/T 7477—1987)测定; K⁺及 Na⁺采用火焰光度法测定; CO₃²⁻及 HCO₃⁻采用双指示剂-中和滴定法 (GB/T 11896—1989)测定; SO₄²⁻采用质量法测定。

1.4 数据分析

运用 SPSS 19.0 进行描述性统计分析,使用独立 样本 t 检验(t-test)进行方差分析(P<0.05 水平)。 使用 SPSS 19.0 进行相关分析。使用 R 3.6.2 分别对降 水量、地下水埋深及土壤含水率与耕层土壤电导率进 行线性拟合。使用 Origin 9.1 绘制 Piper 图,其他图使 用 Microsoft Excel 2019 绘制。

2 结果与分析

2.1 降水量、地下水埋深及土壤含水率对耕层土壤电 导率的影响

图 2 (a) 为 2019—2020 年电导率月均值年内变 化。2019 年 0~20 cm 耕层土壤电导率最大值为 422.0 μS/cm,出现在 11 月,而 2020 年最大值为 411.5 μS/cm, 出现在 10 月,但 2019、2020 年最大月降水量均发生 在 8 月,其值分别为 203.0、311.3 mm。故降水对耕 层土壤电导率的影响存在一定的滞后性,滞后约 2~3 个月。2019、2020 年地下水埋深存在明显差异(图 2 (b)),尤其是 2020 年 7—10 月地下水埋深急剧降低 (变化幅度为 6.8 m)。因此,地下水位上升可能是导 致耕层土壤电导率最大值提前出现的原因。由图 2(c) 可知,2019、2020 年耕层土壤电导率最大值出现在 10—11 月,而耕层土壤质量含水率未表现出相似规律。



Fig.2 Monthly tendency analysis of precipitation, groundwater depth, soil mass water content and 0~20 cm surface soil conductivity

2010—2020年每年10月0~20 cm 耕层土壤电导 率表现为先减少后增加的趋势(图3(a)),2014年 土壤电导率最小为149.8 µS/cm,其中2014年8月降 水量最小为40.4 mm,而2018年8月降水量最大为 471.6 mm。图4为不同年份降水量、地下水埋深、土 壤质量含水率与耕层土壤最大电导率(10月)线性 回归分析,图中*表示方程拟合效果在P<0.05水平显 著。由图4可知,耕层土壤最大电导率(10月)与 当月降水量负相关,而与3个月内累积降水量(图4 (a))及提前2个月降水量正相关。其中,提前2个 月降水量与耕层土壤最大电导率显著负相关 (P<0.05),可用于预测降水量变化对耕层土壤最大 电导率的影响。









2010—2020 年地下水埋深表现为先上升后下降 的趋势(2015 年 6 月地下水埋深最大为 8.3 m),而 电导率变化趋势表现为先下降后上升的趋势(图 3 (b))。根据地下水埋深周期性变化趋势分析可知(表 1),地下水埋深在每年 6、7 月最大,9 月地下水埋 深开始降低。耕层土壤最大电导率(10 月)与提前 2 个月地下水埋深(图 4 (b))及当月地下水埋深负相 关,随着地下水埋深增加耕层土壤电导率表现为下降

0

趋势,且耕层土壤最大电导率与地下水埋深为不显著 负相关。

2010—2020 年土壤质量含水率长期变化趋势不明显(图3(c)),土壤质量含水率在每年5月最低, 8月最高(表1)。当月土壤质量含水率(图4(c)) 与耕层土壤最大电导率显著负相关(P<0.05),其拟 合效果优于提前2个月土壤质量含水率(x)与耕层 土壤最大电导率(y)的线性拟合效果。

表	走1	降水量、	地下水均	里深及耕	层土壤	质量含	水率周	朝性变化	幅度	
Table 1	Dor	iodicity r	ange of pr	ecinitati	on arou	indwate	r denth	and soil	water cont	tor

					, 8		- r,					
变化幅度	1月	2 月	3月	4 月	5 月	6月	7 月	8月	9月	10 月	11 月	12 月
降水量/mm	-49.42	-45.92	-43.77	-15.94	-1.58	10.54	81.16	119.79	38.89	-14.56	-27.33	-51.87
地下水埋深/m	-0.72	-0.64	-0.28	0.11	0.37	1.92	1.34	0.01	-0.53	-0.43	-0.55	-0.61
~20 cm 土层土壤质量含水率/%	1.38	2.06	-1.13	-2.87	-4.15	-0.53	-1.92	2.47	2.41	0.39	1.02	0.87
r 表出教授中时间序列增刊 ^[17] 公祝五束(2010—2020 年),正传表三梯加,各传表三裙小												



图 4 降水量、地下水埋深及土壤质量含水率与耕层土壤最大电导率(10月)线性回归分析

Fig.4 Linear regression relationship between precipitation, groundwater depth,

soil mass water content and 0~20 cm surface soil maximum conductivity in October

浅层地下水电导率变化趋势与耕层土壤电导率变 化趋势一致(图5),2014年浅层地下水电导率及耕层 土壤(0~20 cm)电导率均达到最低水平,此时耕层土 壤电导率及地下水电导率分别为149.8、1099.3 μS/cm。



2.2 不同土层深度土壤质量含水率及八大离子量 2020年不同土层土壤中可溶性盐量(CO₃²除外) 均高于 2015 年(图 6)。2020 年各土层中 Ca²⁺、Mg²⁺、 HCO₃⁻、SO₄²⁻、CI量分别比 2015 年相应离子量提高 111.4%~422.3%、480.0%~852.8%、136.8%~176.4%、 877.6%~2 122.0%、984.4%~1 810.0%。土壤 Na⁺量及 电导率均随土层深度增加呈增加趋势,不同年份中 K⁺量随土层深度增加呈降低趋势,2020 年 0~10 cm 土层中 K⁺量比 2015 年高 63.3 mg/kg,而在其他土层 中 K⁺量差距较小。

2.3 耕层土壤及周边水体可溶性盐量变化

表 2 为 2015、2020 年 10 月耕层土壤八大离子量。 由表 2 可知, Na⁺为土壤中主要阳离子, 2015 年 Na⁺ 量分别为 Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺量的 1.75、5.80、5.00 倍, 其在 2020 年则分别为 Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺量的 2.22、2.79、 4.18 倍。2015 年与 2020 年耕层土壤中 Ca²⁺、Mg²⁺、 Na⁺、HCO₃⁻、SO₄²⁻、CI⁻量差异均显著(*P*<0.05),且 2020 年 Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、HCO₃⁻、SO₄²⁻、CI⁻量分别 比 2015 年相应离子量提高 135%、525%、199%、165%、 1 662%、1 456%。







表 2	0~20 cm	土层土壤,	ヽ 大离子量

		Table 2	Discrepancy ana	mg/kg				
指标	Ca ²⁺	Mg^{2+}	\mathbf{K}^+	Na ⁺	HCO3 ⁻	CO3 ²⁻	SO_4^{2-}	Cl
2015 年	40 <u>±</u> 4	12±2	14±3	70±13	199±16	-	48±15	23±5
2020年	94±6	75±12	50±26	209 ± 18	528±17	-	846±72	358±17
<i>t</i> 值	-7.557	-5.120	-1.399	-6.324	-14.114	-	-10.855	-18.746
<i>P</i> 值	0.000	0.006	0.232	0.000	0.000	-	0.000	0.000

注 CO3²⁻未检测出。

2015、2020 年浅层地下水中 Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、 HCO₃⁻、CO₃²⁻、SO₄²⁻量均差异显著(*P*<0.05),2020 年浅层地下水中 Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、HCO₃⁻、SO₄²⁻、 Cl⁻量均高于 2015 年,而 CO₃²⁻则相反(表 3)。而流 动地表水中各离子(Na⁺除外)量差异不显著,2015 年阳离子量表现为 Ca^{2+} 、 $Mg^{2+}>Na^+>K^+$, 阴离子量 表现为 $SO_4^{2-}>HCO_3^->CI^>CO_3^{2-}$; 2020 年阳离子量表 现 为 $Na^+>Ca^{2+}>Mg^{2+}>K^+$, 阴离子量表现为 $HCO_3^->SO_4^{2-}>CI^>CO_3^{2-}$ 。

表 3 不同年份水体八大离	离子	日里
---------------	----	----

	Table 3 D	Discrepancy analysis of eight major ions of water bodies in different years									
水体	指标	Ca ²⁺	Mg^{2+}	\mathbf{K}^+	Na^+	HCO ₃ ⁻	CO3 ²⁻	SO4 ²⁻	Cl		
浅层地下水	2015 年	26±2b	25±7b	6±2a	44±7B	130±16b	8±2B	288±71b	269±60a		
	2020年	177±20a	174±18a	6±4a	369±100A	960±39a	0±0A	611±62a	453±73a		
流动地表水	2015 年	40±20a	40±24a	3±1a	35±7B	168±35a	15±7a	181±18a	145±43a		
	2020年	45±5a	43±5a	5±1a	99±22A	241±35a	14±2a	201±28a	160±20a		

注 表中不同小写字母表示 2个年份该离子量在 P<0.01 水平差异显著,不同大写字母表示 2个年份该离子量在 P<0.05 水平差异显著。

由表 4 可知, 耕层土壤中 HCO₃、SO₄²⁻、Ca²⁺、 Mg²⁺、K⁺、Na⁺与浅层地下水中相应离子正相关, 其中 HCO₃⁻、SO₄²⁻、Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺表现为显著正相关 (*P*<0.05)。故耕层土壤与浅层地下水各离子关系密切。 2015 年耕层土壤浸出液与浅层地下水及流动地 表水化学类型差异明显, 而在 2020 年 3 种水体化学 类型相似(图 7)。2015 年, 耕层土壤浸出液水化学

类型为 Na Ca-HCO₃, 浅层地下水类型为 Na Mg-SO₄ Cl, 流动地表水化学类型为 Mg Ca-HCO₃ SO₄ Cl; 2020 年, 耕层土壤浸出液水化学类型为 Na Mg-SO₄ Cl, 浅层地下水化学类型为 Na Mg-HCO₃ SO₄ Cl, 流动地表水化学类型为 Na Mg-HCO₃ SO₄ Cl, 此时不同水体中阳离子种类相同。

表 4 耕层土壤离子量与浅层地下水中离子量相关性分析

Table 4 Correlation between surface soil iron content and shallow groundwater iron content

本泥					浅层地下水				
木塚	指标	CO3 ²⁻	HCO ₃ ⁻	SO4 ²⁻	Cl	Ca ²⁺	Mg^{2+}	\mathbf{K}^+	Na^+
	CO3 ²⁻	-	-	-	-	-	-	-	-
耕层土壤	HCO ₃ ⁻	-0.816**	0.967**	0.753*	0.529	0.879**	0.879**	-0.003	0.663*
	SO4 ²⁻	-0.797**	0.973**	0.713*	0.501	0.854**	0.872**	0.122	0.643*
	Cl	-0.846**	0.982**	0.720*	0.488	0.892**	0.900**	0.009	0.674*
	Ca^{2+}	-0.783**	0.905**	0.713*	0.548	0.882**	0.915**	-0.125	0.735*
	Mg^{2+}	-0.749*	0.841**	0.582	0.386	0.756*	0.801**	0.148	0.583
	\mathbf{K}^+	-0.369	0.52	0.392	0.354	0.418	0.447	0.047	0.322
	Na ⁺	-0.837**	0.908**	0.655*	0.436	0.858**	0.805**	-0.049	0.649*

注 **表示在 P<0.01 水平上显著相关; *表示在 P<0.05 水平上显著相关。



图 7 土壤浸出液、浅层地下水及流动地表水 Piper 图 Fig.7 Piper diagram of soil leaching solution, shallow groundwater, and surface flowing water

3 讨论

3.1 水分条件与耕层土壤盐分关系探究

耕层土壤盐分与降水量、地下水埋深及土壤质量 含水率均关系密切。本研究表明,耕层土壤最大电导 率通常出现在每年的10—11月,滞后于最大降水量 的出现时间,尤其 10 月耕层土壤电导率与当年最大 月降水量(提前 2 月降水量,即 8 月降水量)显著线 性相关(图 4)。张蛟等^[18]研究表明,沿海滩涂表层 土壤盐分存在季节性变化规律,且在每年的 10—12 月有明显的积盐现象。此外,降雨在提高耕层土壤含 水率的同时还会抬升地下水位,进而促使农田地表秸 秆降解、农药化肥溶解及生活污水扩散,最终致使耕 层土壤盐分升高^[19]。10 月的耕层土壤电导率与当月 耕层土壤含水率负相关(*P*<0.05),而与地下水埋深 不显著负相关,进一步说明降水是引起耕层土壤电导 率变化的重要原因。

本研究发现,2020 年耕层土壤浸出液中 Ca²⁺、 Mg²⁺、K⁺、Na⁺、HCO₃⁻、SO₄²⁻、Cl⁻量均显著高于 2015 年。其原因是秸秆及植物残体降解形成有机质 (表 5),随后分解为各类有机酸^[20](胡敏酸、黄腐酸 等^[21]),且降水量增加及地下水位上升会加速该过程 (秸秆分解速率与土壤含水率正相关^[22]),致使耕层 土壤 pH 值明显降低(图 8),而酸性环境会促进耕 层土壤矿物的溶解(如含有 Ca²⁺、Mg²⁺等矿物)。

表5 0~20 cm 土层土壤有机质量

]	Fable 5 Organic control	ontent in 0~20 cr	n topsoil		g/kg
2010年	2014 年	2015 年	2016年	2017 年	2018 年	2019 年	2020年
3.5±0.2	4.9±0.3	26.0±1.1	21.0±1.2	35.4±1.7	26.9±2.0	22.7±1.4	26.2±2.2
10 9 8 7 2010	 流动地表水 浅层地下水 0~20 cm耕层土 1 2012 2012 2012 2012 2012 2013 2014 2015 2015 	壤浸出液		 3.2 土层沟 Seebo 分易在表所 发现,2020 HCO₃、SO 当降水量转 难以随水分 然而随着阿 机酸易随力 生溶解(如 	张度与盐分迁移 onruang ^[23] 研究 会土壤聚集而近 0年10月各土 04 ²⁻ 、CI量均高 交小且地下水伯 分发生迁移所以 条水量增加及却 K分迁移到深月 0~100 cm 土	8特征的关系 活表明,地下水 造成土壤次生盘 层土壤中 Ca ²⁺ 5于 2015 年 10 立较低时(201: 以不会对周边2 也下水位升高 层土壤,使得深 层,图 6)并导	.埋深较小时盐 盐碱化。本研究 、Mg ²⁺ 、Na ⁺ 、 月,其原因为 5年),有机酸 K体产生影响; (2020年),有 三层土壤矿物发 梁致水体 pH 值

Fig.8 Dynamic change of pH in topsoil and two kinds of water

生溶解(如 0~100 cm 土层,图 6)并导致水体 pH 值 (图 8)降低^[24]。另外,不同区域土壤浸出液与浅层 地下水中 Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、HCO₃⁻、SO₄²⁻量显著正 相关,说明耕层土壤是浅层地下水可溶性盐的重要来 源。而浅层地下水中 CO₃²⁻与土壤浸出液中各离子负 相关,分析得出 CO₃²⁻量下降时,水体中 Ca²⁺、Mg²⁺ 不易形成 CaCO₃ 及 MgCO₃ 沉淀,而水体中盈余的阳 离子需要其他阴离子来平衡,这一现象促使水体中其 他阴离子量增加。

本研究发现各离子在浅层土壤中(0~100 cm)的 分布规律存在差异。具体表现为: 2020 年耕层土壤 中 Ca^{2+} (0~60 cm)、 Mg^{2+} (0~40 cm) 量随土层深度 增加而逐渐降低,其原因为表层土壤中富含有机质且 pH 值更低, 使得表层土壤中矿物更易分解从而提高 了 Ca²⁺、Mg²⁺量^[25]。然而, K⁺不易随水分发生迁移 且主要分布在 0~40 cm 土层内^[11], 当降水量增加时 0~10 cm 土层 K⁺量明显升高,此时 K⁺更易随地表径 流发生移动。土壤中含 Na⁺的矿物较少,其来源主要 为生活污水及次生易溶性盐类,随着土层深度增加, Na⁺量反而升高,说明 Na⁺易随土壤水分发生迁移。 2020 年时土壤电导率随土层深度增加而变大,与土 壤中主要阳离子 Na⁺变化规律相似, 据此推测 Na⁺可 能是引起土壤电导率升高的重要因素[26]。前人研究[12] 表明, SO42-、CI主要集中在 50 cm 以内的表层土壤 中,当土层深度超过 50 cm 时 2 种离子量明显下降。 本研究表明,在地下水位较高时(2020年),表层土 壤 (0~60 cm) SO₄²⁻、CI⁻质量浓度较高,但 60~100 cm 深层土壤中 SO42, CI质量浓度不减反增,这可能是 因为此时浅层地下水位较高,离子易随土壤水分向下 运移。

此外,2020 年降水量增加及地下水位上升会增加土壤与水体间的连通性,导致耕层土壤浸出液、流动地表水和浅层地下水化学类型相似,此时土壤浸出液的阴离子类型(主要阴离子由 HCO₃ 转变为 SO₄²⁻和 Cl⁻)会发生明显变化,其原因可能为农药(含 Cl⁻)、化肥(如 KCl、K₂SO₄)溶解^[27]及有机质分解^[28]导致土壤浸出液中 2 种离子量(SO₄²⁻、Cl⁻)升高。另外,2020 年浅层地下水中 SO₄²⁻及 Cl⁻量超过 350 mg/L,不符合农业用水质量要求(GB/T 14848—2017)。因此,当降水量增加及地下水位升高时,应控制农药化肥施用量以减弱其对环境的破坏。

综上,降水量及地下水位变化是引起土壤盐分迁 移的重要因素,尤其在二者均表现为上升趋势时极易 导致土壤次生盐碱化。此外,通过降水量可以初步预 测耕层土壤盐分变化趋势,为后续预防次生盐碱化风 险提供有效指导,但目前耕层土壤电导率与水分参数 间拟合方程是否适用于其他区域及时间跨度更大的 历史数据仍待进一步探究。

4 结 论

1)豫东地区农田耕层土壤电导率最大值通常出现在 10—11 月,0~20 cm 土层土壤电导率(10 月)受年最大降水量、地下水埋深及土壤质量含水率共同影响,其与 8 月降水量的拟合效果最佳,拟合式为y=0.794 3x+126.65, R²为 0.631 3, P<0.05。

2)降水量增加及地下水位升高是导致豫东地区土 壤、水体盐离子质量浓度升高的重要原因。耕层土壤 浸出液、浅层地下水及流动地表水水化学类型表现出 高度相似性。且耕层土壤(HCO₃⁻、SO₄²⁻、Ca²⁺、Mg²⁺、 Na⁺)与浅层地下水中 HCO₃⁻、SO₄²⁻、Ca²⁺、Mg²⁺、 Na⁺离子量显著正相关(*P*<0.05)。故耕层土壤是水体 可溶性盐离子的重要来源。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- 于洪婷.基于不同粮食主产区粮食生产能力差异的国家粮食安全策 略研究[D].长春:吉林大学,2013.
 YU Hongting. Research on the strategy of national grain security based on analysis of differences of grain production capacity in different major grain producing areas[D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [2] 宰松梅,仵峰,丁铁山,等.引黄灌区土壤次生盐碱化防治对策研究[J]. 人民黄河,2010,32(3):66-68.
- [3] 贾大林,李占柱,刁绍全,等.黄淮海平原商丘李庄实验区旱涝盐碱综合治理研究[J].中国农业科学,1984,17(1):62-67.
 JIA Dalin, LI Zhanzhu, DIAO Shaoquan, et al. A study on the integrated management of drought, water-logging and salinization at an experimental area in the Plains of Huang-Huai-Hai River valley[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1984, 17(1): 62-67.
- [4] KAHLOWN M A, AZAM M. Effect of saline drainage effluent on soil health and crop yield[J]. Agricultural Water Management, 2003, 62(2): 127-138.
- [5] 高彦花. 渤海湾盐碱地土壤水盐动态及耐盐植物改良盐渍土研究[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2011.
 GAO Yanhua. Study on the dynamics of water and salt in saline soil and amelioration of saline soil by salt-resstance plants in Bohai Bay[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2011.
 [6] 陈文娟,李明思,秦文豹,等.水平翻耕措施对覆膜滴灌土壤水盐分
- 布调控效果研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 276-286. CHEN Wenjuan, LI Mingsi, QIN Wenbao, et al. Effect of horizontal tillage measures regulatory on soil water and salt distribution under mulched drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 276-286.
- [7] 化骞寂,冯绍元,葛洲,等.河套灌区典型区周年内耕层土壤盐分时 空变异研究[J]. 灌溉排水学报,2020,39(8):26-34.
 HUA Qianji, FENG Shaoyuan, GE Zhou, et al. Intra-annual spatiotemporal variation in salt content in the plough layer in Hetao Irrigation District[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(8): 26-34.
- [8] 王丹影,马延东,贾志峰,等. 玛纳斯河流域沙漠与绿洲过渡带土壤 水盐变化特征与规律[J]. 中国农学通报, 2020, 36(20): 44-50.
 WANG Danying, MA Yandong, JIA Zhifeng, et al. Characteristics and law of soil water and salt changes in the desert and oasis transition zone of the Manas River Basin[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(20): 44-50.
- [9] 王航,周青云,张宝忠.不同滴灌水量对河套灌区覆膜玉米田土壤 盐分的影响研究[J]. 灌溉排水学报,2022,41(5):72-83.

WANG Hang, ZHOU Qingyun, ZHANG Baozhong. The effects of drip-irrigation amount on soil salinity in film-mulched corn field in Hetao Irrigation District[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(5): 72-83.

- [10] 田生昌,陈新会,马建军,等. 种稻对周围旱地土壤盐分和土壤水分 含量的影响[J].西北农业学报,2012,21(7):77-83. TIAN Shengchang, CHEN Xinhui, MA Jianjun, et al. Planting rice on the surrounding dry land soil salinity and soil moisture content influence the research[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2012, 21(7): 77-83.
- [11] 王计平.干旱条件下氮、磷、钾元素随滴灌水运移规律及影响因素 研究[D].太谷:山西农业大学,2001.
- [12] 叶文,王会肖,高军,等.再生水灌溉土壤主要盐离子迁移模拟[J]. 农业环境科学学报,2014,33(5):1007-1015.
 YE Wen, WANG Huixiao, GAO Jun, et al. Simulation of salt ion migration in soil under reclaimed water irrigation[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(5):1007-1015.
- [13] 冯柳俊,陈志强,陈志彪,等. 模拟降雨淋溶下离子型稀土矿区稀土的纵向迁移[J].稀土,2020,41(5):19-29.
 FENG Liujun, CHEN Zhiqiang, CHEN Zhibiao, et al. Longitudinal migration of rare earths in ionic rare earth ore deposits under simulated rainfall leaching[J]. Chinese Rare Earths, 2020, 41(5): 19-29.
 [14] 许璇,何新林,衡通,等. 干旱区膜下滴灌配合暗管与竖井排水对棉
- [14] 计减,问新怀, 例题, 守. 十十区牍门制准癿占咱自与金升计不利带 田土壤盐分的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(6): 95-104. XU Xuan, HE Xinlin, HENG Tong, et al. Effects of subsurface pipe and shaft on soil salinity in cotton field in arid saline-alkali land under drip irrigation and mulch[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(6): 95-104.
- [15] 关共凑,魏兴琥. 自然降雨对粤北岩溶区土壤钙、镁离子流失影响模 拟试验[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 73-76, 83. GUAN Gongcou, WEI Xinghu. Simulation experiment on effect of soils calcium and magnesium ions losses on natural rainfall in Karst rocky area of North Guangdong[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(5): 73-76, 83.
- [16] 潘贤章,郭志英,潘恺. 陆地生态系统土壤观测指标与规范[M]. 北京:中国环境出版集团,2019.
- [17] 杨海民,潘志松,白玮.时间序列预测方法综述[J]. 计算机科学,2019,46(1):21-28.
 YANG Haimin, PAN Zhisong, BAI Wei. Review of time series prediction methods[J]. Computer Science, 2019, 46(1): 21-28.
- [18] 张蛟, 崔士友, 冯芝祥, 等. 气候因子和地表覆盖对沿海滩涂土壤盐 分动态的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(2): 294-302.
 ZHANG Jiao, CUI Shiyou, FENG Zhixiang, et al. Climatic factors and mulching affect soil salinity dynamics in coastal areas[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(2): 294-302.
- [19] 王艺乔,郑春莲,李科江,等.施用有机肥对咸水灌溉农田耕层土壤有

机质及水稳性团聚体的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(2): 268-274. WANG Yiqiao, ZHENG Chunlian, LI Kejiang, et al. Effects of organic fertilizer application on soil organic matter and water-stable aggregates of plow layer in farmland with saline water irrigation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2): 268-274.

[20] 赵绪生,齐永志,闫翠梅,等.小麦、玉米两熟秸秆还田土壤中6种 有机酸对小麦纹枯病的化感作用[J].中国农业科学,2020,53(15): 3 095-3 107.

ZHAO Xusheng, QI Yongzhi, YAN Cuimei, et al. Allelopathy of six organic acids on wheat sheath blight in the soil of winter wheat-summer maize double cropping straw returning system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(15): 3 095-3 107.

[21] OHNO T. Fluorescence inner-filtering correction for determining the humification index of dissolved organic matter[J]. Environmental Science & Technology, 2002, 36(4): 742-746.

 [22] 左玉萍, 贾志宽. 秸秆分解土壤水分适宜区间及临界值[J]. 西北农 业学报, 2003, 12(3): 73-75.
 ZUO Yuping, JIA Zhikuan. Suitable soil water content and critical value for straw decomposing[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2003, 12(3): 73-75.

- [23] SEEBOONRUANG U. Relationship between groundwater properties and soil salinity at the Lower Nam Kam River Basin in Thailand[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 69(6): 1 803-1 812.
- [24] QUALLS R G, HAINES B L. Biodegradability of dissolved organic matter in forest throughfall, soil solution, and stream water[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(2): 578-586.
- [25] 胡华锋,刘世亮,介晓磊,等.低分子量有机酸对矿物的溶解作用[J]. 中国农学通报,2005,21(4):104-109.
 HU Huafeng, LIU Shiliang, JIE Xiaolei, et al. The role of low molecular weight organic acids on mineral dissolution[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21(4):104-109.
- [26] 王境坤. 天津市西青区土壤含盐量与电导率关系分析[J]. 吉林水利, 2015(9): 28-32.
 WANG Jingkun. Analysis the relationship between soil salinity and conductivity in Tianjin Xiqing District[J]. Jilin Water Resources,
- 2015(9): 28-32.
 [27] 孙慧敏. 农田土壤氯离子累积与迁移机理[D]. 杨凌: 西北农林科技 大学, 2004.

SUN Huimin. Accumulation and transfer mechanism of Cl- in farmland soil[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2004.

[28] 蔡绪贻,陈静生,桂平,等.华北地区城市地下水中主要离子含量升高机理分析:以洛阳市为例[J].环境化学,1995,14(5):393-401.
CAI Xuyi, CHEN Jingsheng, GUI Ping, et al. The mechanism controlling the variations of major ions concentration in groundwater in urban in North China area: A case study of Luoyang city[J]. Environmental Chemistry, 1995, 14(5): 393-401.

Migration of Salt in Plough Layer and Its Determinants in Farmlands in Eastern Henan Province

REN Wen^{1,2}, DING Dawei^{1,2,3}, LIU Anneng^{1,2}, CHEN Jinping^{1,2}, YONG Beibei^{1,2},

LIU Chuncheng¹, GUO Chengshi^{1,2}, ZHANG Zhixin⁴, XIE Kun^{1,2*}, LI Zhongyang^{1,2*}

(1. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China;

2. National Agro-ecological System Observation and Research Station of Shangqiu/National Agricultural Experimental Station for

Agricultural Environment, Shangqiu/National Long-term Agricultural Green Development Experiment and Observation Station,

Shangqiu 476000, China; 3. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

4. College of Grassland Agriculture, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: [Objective] Soil salinization due to shallow groundwater table is a main abiotic stress facing agricultural

production in eastern Henan province. In this paper we analyze the migration of salt in the plough layer and its relationship with geochemistry of both surface water and groundwater at different seasons. [Method] The experiment was conducted in areas adjacent to the National Agro-ecological System Observation and Research Station of Shangqiu. We measured salt content, depth of groundwater table, as well as surface water runoff from 2010 to 2020. The relationship between salt content and these environmental factors was calculated using the descriptive statistics and Piper figure analysis method. [Result] The increased salt content in the top 0~20 cm soil layer was mainly induced by the increased precipitation. The maximum electric conductivity of the topsoil layer occurred between October and November, but it is linearly correlated to precipitation in August (y=0.794 3x+126.65, $R^2=0.631$ 3, P<0.05). The content of Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, HCO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻ and electric conductivity of water in the topsoil layer and the 0~100 cm soil layer, as well as depth of the shallow groundwater table in 2020 was significantly higher than those in 2015 (P<0.05). We also found that the leachate from the topsoil was geochemically similar to that of the shallow groundwater and the surface runoff in 2020, indicating that the soluble salt in the topsoil was related to both surface water and subsurface water. [Conclusion] The electric conductivity of water in the topsoil layer and the 0~100 cm-depth soil layer in October was both positively correlated to precipitation and the depth of the groundwater table, suggesting that salt in the topsoil was hydraulically connected to soluble salt in the surface water and the subsurface water. Key words: salt migration; soil soluble salt; soil conductivity; topsoil; water environment

责任编辑: 白芳芳

(上接第106页)

Simulation Frost Heaving of Trapezoidal Channel and Optimization of Lining Seam Design with Solar Radiation in Considerations

WANG Jianyou¹, LIANG Taili¹, LU Linfang², WANG Juan¹, SHI Pengchao¹

(1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Zhaokou Yellow Diversion Irrigation District Phase II Project Construction Administration, Kaifeng 475008, China)

Abstract: [Objective**]** Frost and heaving are natural hazards faced by water channels in temperate and boreal regions. In this paper we proposed a model to simulate frost and heaving of trapezoid channels by considering the effect of solar radiation. The simulated results were used to optimize the lining seam. **[**Method**]** The simulation was based on the software ABAQUS. We first calculated the influence of angle and efficiency of solar radiation on the temperature of the two slopes of the channel, and then used this to estimate the temperature change in the concrete lining surface. This, combined with the lowest daily temperature, was used as a boundary condition of the trapezoidal channel in numerical simulation. The model was applied to the trapezoidal channel in the Zhaokou Yellow Diversion Irrigation district. The temperature, stress and deformation field simulated by the model were used to optimize two kinds of lining joints, one was at the toe of the shadow slope and the other one was at a position 1/3 (of the slope length) from the toe. **[**Result**]** The simulated freezing depth and cracking position are in good agreement with the measured data. The channel linings for mitigating frost swelling was more effective when the seam was 1/3 away from the slope foot. **[**Conclusion **]** Using the temperature boundary condition calculated by the proposed method, the model can accurately simulate the destruction of trapezoidal channels by frost heave. The simulation results are in good agreement with empirical data, which can help channel design to mitigate the adverse effect of frost and heave on trapezoidal channels in temperate and boreal regions.

Key words: trapezoidal channel; channel frost heaving; solar radiation; lining design

责任编辑:赵宇龙