

# 耕作期内土壤水分和盐分运动规律及其影响因素

张楠<sup>1</sup>, 韩金旭<sup>1</sup>, 江红<sup>2</sup>, 苏晓慧<sup>1</sup>, 章博<sup>1</sup>, 杜凯<sup>1</sup>

(1. 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003; 2. 黄河流域水资源保护局, 河南 郑州 450004)

**摘要:** [目的] 分析灌溉期内土壤水盐运动规律, 为改进灌区耕作期灌溉制度存在的现行问题、土壤盐碱化治理以及节水型灌溉工程的实施对生态环境的影响提供科学指导。[方法] 综合考虑土壤质地、灌溉方式、作物种植等因素进行试验点、观测点的布设, 基于 2 a 耕作期监测数据分析, 通过常规方法对土壤脱盐积盐运移(表聚型、底聚型、均衡型及震荡型)、耕作期内不同耕种观测区内土壤盐分变化等方面进行计算分析, 并对影响因子(地下水埋深、初始含盐量、降雨)进行相关性分析。[结果] 灌溉初期土壤表层含盐量变化较早, 灌后 10 d 土壤含盐量开始回升, 各观测区土壤含盐量随时间逐渐减小。[结论] 荒地内不同土层观测期内呈积盐状态; 不灌或少灌区域土壤表聚趋势加强; 地下水埋深较深的井灌区, 脱盐速率快于潜水位较高的渠灌区; 初始含盐量越高, 土壤脱盐量绝对值越大, 相对脱盐率与初始含盐量并无明显关系。

**关键词:** 耕作期; 剖面分区; 脱盐积盐; 表层积盐; 盐分运动

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)06-0008-07

中图分类号: S152.7, S257, S156

## Movement Regularity and Its Influence Factors of Soil Salt and Moisture During Farming Period

ZHANG Nan<sup>1</sup>, HAN Jinxu<sup>1</sup>, JIANG Hong<sup>2</sup>, SU Xiaohui<sup>1</sup>, ZHANG Bo<sup>1</sup>, DU Kai<sup>1</sup>

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou, He'nan 450003, China;

2. Yellow River Basin Water Resources Protection Bureau, Zhengzhou, He'nan 450004, China)

**Abstract:** [Objective] The change regularity of soil water and salt in the farming period was analyzed to improve the present irrigation method in order to provide scientific guidance for salinization control, and to test the impacts of water-saving irrigation on ecological environment. [Methods] Observation sites and test points were selected according to indices of soil texture, irrigation method, crop cultivation and other factors. After two years of observation and test, changes of soil salinity in profiles were calculated and analyzed, and the regularity patterns of desalination and salinization were identified (normal, inverted, even and concussion type). The correlations among the impacting factors of movement regularity as ground water level, preliminary salinity and rainfall were analyzed. [Results] Trend of normal accumulation strengthened in unirrigation or less irrigation area. Surface soil salinity changed as early as in the preliminary stage of irrigation, for example, 10 days after irrigation, soil salinity was observed beginning to rise. Soil salinity had greater than that before irrigation activities (or before rain). Soil in survey area (except of wasteland) were observed in desalination state during cultivation period, and the soil salinity decreased regularly with time. [Conclusion] Soil in wasteland was observed in a normal salinity state, and enhanced surface accumulation of salinity was observed at sections with no or less irrigation. Rates of desalination in districts where were irrigated using well with low ground water level were faster than those in canal irrigation areas with high groundwater level.

**Keywords:** farming period; section partition; desalination of salt deposition; surface salt accumulation; soil movement

收稿日期: 2014-07-22

修回日期: 2014-08-05

资助项目: 国家自然科学基金项目“傍河开采对河川径流袭夺量影响研究”(51309107); “十二五”科技支撑计划项目“黄河中游河川径流锐减驱动力及人为调控效应研究”(2012BAB02B04)

第一作者: 张楠(1981—), 男(汉族), 安徽省阜阳市人, 博士, 高级工程师, 主要从事水水文水资源、土壤水等研究。E-mail: zhangnan19810202@126.com。

土壤水分、盐分是土壤盐渍化研究中的 2 个重要参数,也是表征当地土壤质量的重要状态变量<sup>[1-2]</sup>。受到地下水对地表过程作用的影响,土壤中发生的各种物理、化学和生物过程尤为复杂,同时由此所产生的土壤盐渍化等问题也尤为突出。盐分在土壤中的积累程度不仅与当地气候条件、土壤的质地和理化性质、灌溉水的化学组分、灌溉制度、栽培耕作措施以及不同作物品种的抗盐性等因素有关<sup>[3-5]</sup>。耕作期内在灌溉水的下渗和强烈的地下水蒸发蒸腾作用下,土壤中水分和盐分的运动更加活跃,不但影响着水量平衡,对土壤中的盐分运动与积聚也有促进作用<sup>[6-8]</sup>。国内外关于土壤盐分运移机理研究从 20 世纪 50 年代开始,Dehghanisanig 等人<sup>[9]</sup>通过研究发现,盐分随水分运动到根区外围的土壤,在湿润前沿累积,作物根系分布范围土壤中的盐分充分稀释,含盐量与灌溉水的含盐量相近,灌溉后,盐分随着土壤水分的再分布而发生运移<sup>[10]</sup>,在脱盐区下形成一个盐分积累区,在湿润峰附近又形成一个高盐区,其盐分含量高于土壤的初始含盐量;李玉义等<sup>[11]</sup>基于 3 种地貌类型,从地下水位、积盐状态、脱盐情况三方面探讨土壤盐分的累积变化规律。这些研究成果对于土壤盐分运移变化提供了良好的研究方法和基础。土壤水盐作为干旱半干旱缺水地区重要的水资源,在灌溉耕作期内耕作层盐分富集、脱盐等具有特别意义<sup>[11]</sup>,而灌溉耕作期土壤水分、盐分的研究相对较少。灌区耕作期土壤水分、盐分变化直接影响灌区的耕作、管理方式,对于干旱半干旱缺水地区发展高效实用的节水型现代农业的建设起着关键作用。本研究进行耕作期内土壤盐分剖面分布分区及脱盐积盐运移规律及变化影响因素研究,用以揭示耕作层盐分富集机理,研究成果对于改进灌区耕作期灌溉制度存在的现行问题以及节水型灌溉工程的实施对生态环境的影响等方面具有实际意义。

## 1 试验设计

野外观测试验按照试验区耕作期,每年从 4 月 24 日开始,至 9 月 18 日结束,历时 149 d,监测期为 2012—2013 年。采集土样 5 693 个,观测地下水埋深 1 010 次,土壤盐分 1 010 次,现场测试地下水水质 1 110 次、灌溉水质 20 次、灌溉水量记录 20 次。同时利用观测期内临近 4 旗县(达拉特旗、土默特右旗、准格尔旗与托克托县)气象数据。本试验采用 17 个观测点,分别布设在 1<sup>#</sup>、9<sup>#</sup>、11<sup>#</sup> 喷灌区及相邻渠灌区内,每个点布设 1 眼地下水观测井,观测井附近田块即为对应的试验观测区,在观测区内取土测含水量及

含盐量。观测点分布及编号详细情况如下:9<sup>#</sup> 喷灌区:布设 6 个观测点;1<sup>#</sup> 喷灌区:布设 7 个观测点;11<sup>#</sup> 喷灌区:布设 4 个观测点。在具体布点时,考虑到喷灌设施工程进展情况,现场布点时暂定了 17 个观测点。A—F 区为渠灌区,灌溉水源为黄河水;G—N 及 Q 区为井灌区,灌溉水源为当地地下水;O—P 区为荒地,未播种,且无灌溉。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤盐分剖面分布及分区

根据试验方案设计,选择 17 个测区(A—Q)观测土壤盐分变化。各观测区垂直方向每 20 cm 采样 1 次,共采样 5 层,最大深度为 100 cm。绘制土壤电导率分层分布图(图 1),根据各土层间电导率差值、极差及变异程度等数据,将土壤盐分剖面划分为表聚型、底聚型、均衡型及震荡型 4 种类型。I 型剖面:表聚型,该类土壤盐分剖面的主要特征是土壤表层 20 cm 以上盐分含量较多,其他层次的盐分含量少于该层,表聚型土壤剖面当前脱盐过程不明显,土壤盐分运行处于上升或平衡状态。II 型剖面:底聚型,表层含盐量相对较低,而下层含盐量较高,土壤盐分处于下行状态。III 型剖面:均衡型,均衡型土壤剖面含盐量随深度增加无明显变化,表层盐分无明显累积。该类型剖面,土体盐分总体平衡,但部分剖面表层或底层盐分稍高,这种剖面土壤盐分处于平衡态,且兼有轻微积盐或脱盐趋势。IV 型剖面:振荡型,该类剖面含盐量在不同深度出现峰谷交替,表层常因表聚效应出现波峰,下层局部亦出现起伏,土壤剖面盐分分布无明显规律可循。该类型剖面土壤盐分可能处于积盐与脱盐的过渡状态,盐分变化动荡,若遇外力因素叠加则可能改变其盐分运移方向。

经对比分析发现,所观测的 17 个剖面中,表聚型剖面数量最多,均布型、底聚型和震荡型剖面数量均较少。各类剖面土壤盐分的分布情况如表 1 所示。从监测点的位置分布来看,表聚型剖面均处在距离黄河较远的 1<sup>#</sup>、11<sup>#</sup> 喷灌区及其附近渠灌区,其余 3 种剖面多分布在距离黄河较近的 9<sup>#</sup> 喷灌区及其附近渠灌区,井灌区仅有零星分布。盐随水的垂直运动而运动是土壤盐分运移的主要特点。本次选择典型观测区,从降雨和灌溉过程剖析盐分在土壤剖面的运移方式。根据测验区水分情况,分析灌后(雨后)10 d 内各土层盐分运动情况。依据灌后(雨后)10 d 内土壤是否出现脱盐(电导率低于灌前)现象,将土壤盐分变化分为脱盐与积盐两种运动状态。

### 2.2 土壤脱盐积盐规律分析

选择 B、F、H、Q 区为典型区域,分析降雨及灌溉

对土壤盐分的影响(图 2)。灌溉及降雨后 10 d 内,观测区各土层土壤盐分均低于灌前。部分观测区在灌后(雨后)初期,土壤盐分出现短暂升高,随后逐步降低,最低值一般出现在灌后(雨后)5~10 d,部分测区最低值出现时间稍早。

表 1 各类剖面土壤盐分剖面分布

类型	试验区	数量	比例/%
表聚型	G, H, I, K, L, M, O, P	8	47.01
底聚型	B, D, Q	3	17.65
均衡型	E, F, N	3	17.65
震荡型	A, C, J	3	17.65

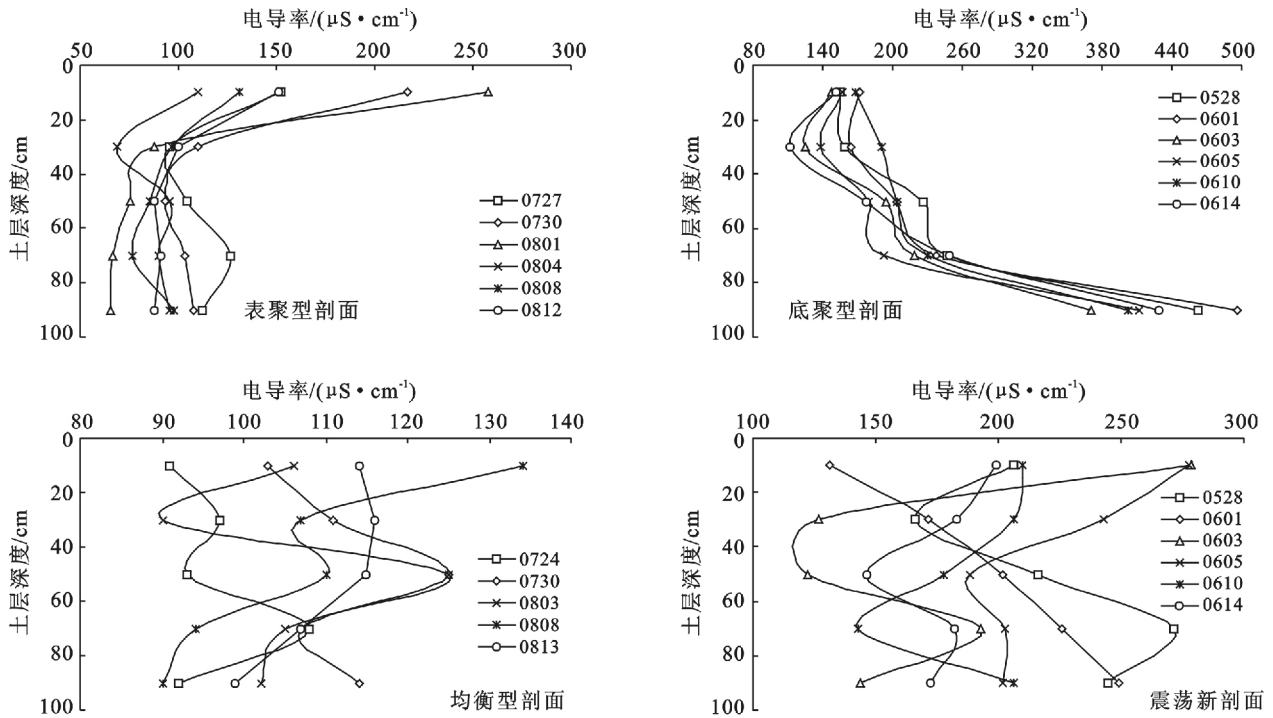


图 1 土壤盐分分布剖面类型

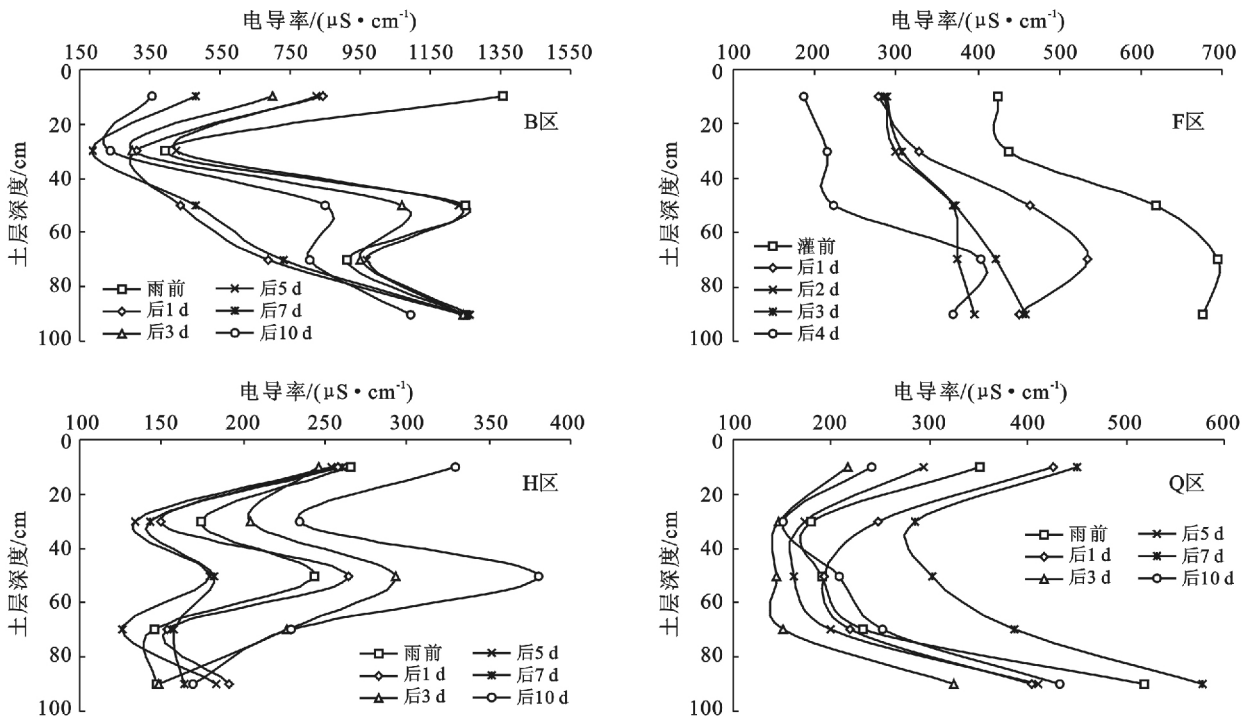


图 2 不同区域土壤盐分剖面运动(脱盐过程)

灌溉初期,土壤表层含盐量变化较早,含盐量升高或降低幅度小于 50 cm。相对于表层,底层土壤含盐量变化较为平缓,在灌溉初期维持稳定或略有升高,表明大量灌水使土壤表层盐分得到淋洗,盐分快速向深层移动,下层盐分维持稳定或略有升高;灌后 3~5 d,各土层土壤盐分经历了一次较明显的脱盐过程,部分观测区土壤含盐量在这一阶段达到最低值,甚至开始小幅回升,中下层土壤含盐量逐渐下降,但

幅度一般小于表层,表明此时土壤盐分随水分进一步下移,深层土壤得到压盐;灌后 10 d,土壤含盐量开始回升,各观测区土壤含盐量接近,甚至出现大于灌前(雨前)的情况。上述分析结果可见,大部分观测区在灌溉(降雨)后经历一次较好的脱盐过程,但试验数据仍发现存在少量测区灌后(雨后)盐分持续升高的现象,绘制典型观测区灌后(雨后)10 d 内土壤盐分变化情况(图 3)。

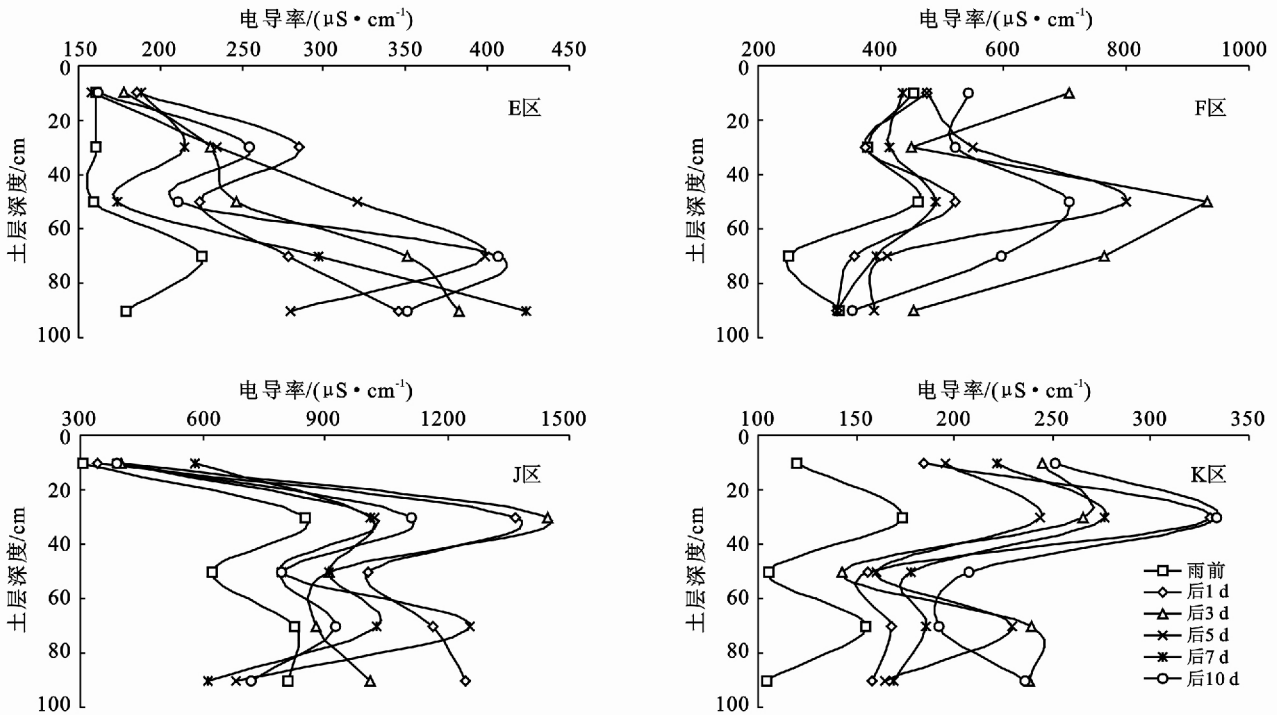


图 3 不同区域土壤盐分剖面运动(积盐过程)

灌溉(降雨)后,观测区土壤盐分出现较明显的升高现象,特别是灌后(雨后)前 3 d,出现土壤盐分的高值,在此后经历一次降低又升高的过程,但土壤含盐量始终大于灌前(雨前)水平,土壤呈积盐状态。在本研究的所观测试验资料中,各次降雨及灌溉过程均出现了这一现象。初步分析可能与土壤前期盐分累积状态有关,也可能在灌溉及降雨后土壤脱盐出现时间较早,并迅速升高,这种现象的解释需下一步调整观测方案深入分析。耕作期内,除荒地外,各观测区土壤含盐量随时间逐渐减小,100 cm 以上土体平均脱盐率 17.7%,其中井灌区脱盐率最大,为 46%,渠灌区为 10.1%;荒地不同土层观测期内呈积盐状态,不灌或少灌区域土壤表聚趋势加强。“盐随水来,盐随水去”是土壤盐分运移的一般规律,但灌水或降雨之后并非所有观测区土壤盐分都会立即下降,有部分观测区出现浅层土壤盐分短暂富集的现象。选择典型区(D, Q 区),分析两次降雨过程(图 4)。由图 4 可

知,降雨及灌水后,两区浅层土壤电导率均迅速增大,其土层范围约在 50 cm 以上,D 区在降雨 10 d 之后,土壤含盐量降至初始值以下,而 Q 区在雨后初期浅层盐分升高之后,即未降至初始值之下,浅层土壤呈积盐状态。这一现象的产生与水分的渗入在土壤过程中创造了通透性更好的盐分运移环境有关。水分入渗土壤后,土壤水力特性较灌前明显改善,部分积聚在浅层的盐分得以借助毛管力上升,如果此时形成适合蒸散的外界环境,地表强烈蒸发促进毛管力进一步发挥作用,土壤则可能出现表层反盐现象,此时盐分仍溶解在土壤水中,此后土壤水逐步下降至深层,盐分也随水分一起被带到深层土壤,最终土体完成脱盐过程。

在各次降雨及灌溉过程中,灌溉过程表层积盐现象少于降雨,较大降雨出现表层积盐现象的概率也显著的低于较小降雨。以监测期 2 a 内 5 月 10 日和 6 月 24—28 日降雨过程进行比较。5 月 10 日前后,观测区经历雨量在 8 mm 左右的一次小雨过程,而在 6

月 24—28 日观测区经历雨量约为 37 mm 的一次持续的较强降雨。对比两次降雨过后土壤盐分的变化可知,5 月 10 日之后,17 个观测区中有 14 个测区土壤盐分出现了不同程度的表聚现象,而后一次降雨之

后仅有一个测区出现这一现象,表明不同量级的雨量(灌水量)对土壤盐分的运动方向存在较明显影响,而各次灌溉均未发现明显的表聚现象,也表明了这一论断的可靠性。

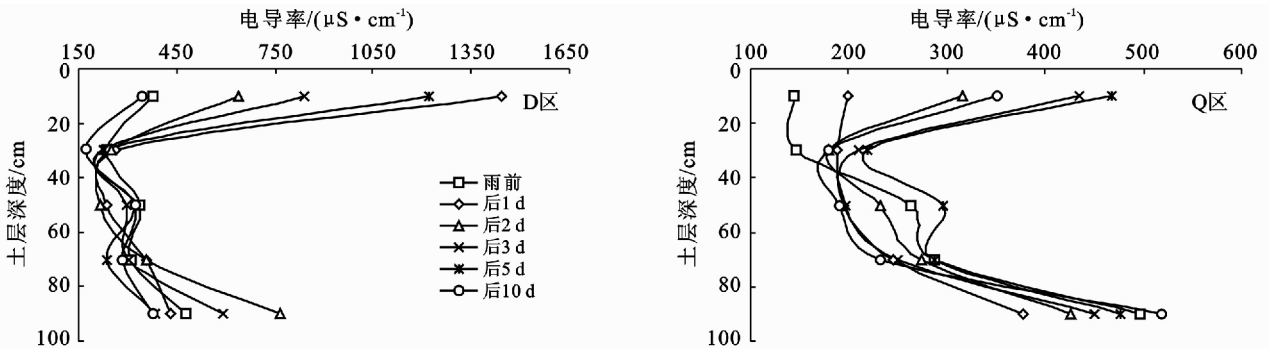


图 4 不同区域土壤盐分剖面运动(表层积盐)

### 2.3 盐分变化影响因素

地下水承接上层土壤的淋洗盐分,含盐量较大,盐分随地下水运动,又直接作用于上层土壤。由不同观测区地下水位与各层土壤含盐量的旬值变化关系可得,各层土壤含盐量均随地下水埋深增加而逐渐减小。在地下水埋深较浅时,土壤盐分含量较大,数值变化剧烈,当埋深大于 2 m 后,土壤含盐量逐渐稳定,表明此时地下水对土壤盐分含量的影响逐渐减小;就不同土层而言,浅层土壤含盐量数据点比较分散,60 cm 以下土层数据点分布紧密,数据变化趋势明显,与土层和地下水之间的相对位置关系相对应,反映出地下水对土壤含盐量变化作用比较明显。在治理土壤盐碱化过程中,应注重控制合理的地下水位,达到洗盐压碱的效果。

地下水位的变化在影响土壤含盐量的同时,对土壤盐分运动也将会产生影响。由于试验在大田开展,增加了土壤基底的空间变异性,很难控制各次灌水量及过程,为便于比较,选择降雨作为典型过程,确定降雨日期为 5 月 21 日,综合考虑雨前土壤初始含盐量均值及土层分布差异较小,地下水埋深相差较大的观测区,经比较确定 D 区与 I 区为典型区域。两观测区均为表聚型断面。分析两区域雨后土壤盐分变化(图 5)。除个别土层外,两区域土壤盐分变化趋势基本一致,均为降雨后盐分小幅下降,随后逐渐上升。虽然 I 区表层土壤初始含盐量与 D 区基本相当,但随着时间的推移,I 区土壤含盐量逐渐下降至 D 区以下,D 区 40 cm 以下土层土壤电导率完全大于 I 区。此外,两区域 40 cm 以上土壤电导率差距较小,但随着土层深度的增加,两区电导率差值逐渐加大。D 区地下水埋深浅,降雨后土壤水和地下水水力学联系紧

密,两者水盐交换频繁。

土壤剖面盐分流失绝对量的大小与许多因素有关,初始含盐量往往决定了土壤盐分变化的量值范围<sup>[16]</sup>。为探索土壤盐分减少量与初始含盐量之间的关系,分析典型降雨(5 月 10 日、5 月 21 日)与灌水(4 月 27 日、7 月 7 日、7 月 9 日、7 月 14 日)过程。将灌水(降雨)后 10 d 内各土层电导率最小值作为终值,灌前(雨前)电导率为初值,两者之差为土壤盐分的变化量。

根据计算结果,分析典型降雨及灌水过程土壤电导率减少量与初始值之间的关系。由分析结果可得,土层初始电导率与电导率变化量之间呈现较好的线性相关关系, $R^2$  均达到 0.9 以上。由于在降雨及灌水过程中,未对观测区域与观测土层进行选择,因而上述结果具有较普遍的指向性。两者之间较好的相关关系可以理解为单位土体中土壤含盐量越大,同体积分溶解盐分越多,因此脱盐绝对量也越大。对电导率相对减少量进行分析,则未发现其与初始含盐量之间存在明显的关系,说明初始含盐量的大小,不能完全决定土壤脱盐效率的高低。

灌溉水质的优劣直接影响农田土壤盐分变化<sup>[17-18]</sup>。高含盐量的灌溉水可能将过多的盐分带入土壤,造成土壤盐分的升高。对咸水灌溉的研究中,多数成果表明<sup>[19-20]</sup>,在允许浓度范围内咸水灌溉会造成土壤盐分的短暂上升,但长期来看仍可起到洗盐的作用。选择典型灌水及降雨过程,分析不同区域土壤盐分变化。根据观测数据,选择 6 月 24—28 日降雨(51.7 mm)、6 月 16 日井灌与 4 月 27 日渠灌进行比较,三者中降雨电导率最低,渠灌黄河水较高,井灌地下盐分含量最高。在区域选择上,降雨过程选择 D

区,井灌选择 H 区,渠灌则为 E 区。绘制各观测区 0—20, 20—40, 40—60 与 80—100 cm 土层电导率与含水率随时间变化情况(图 6)。对比土壤水分与盐分的变化过程,在灌溉(降雨)初期,水分随盐分呈较明显的反比例变化,即随着含水率的升高土壤盐降低,这与灌溉水(降雨)入渗洗盐的最初过程相符合。灌后(雨后)5 d 后,不同观测区两者之间呈正比例变化,表明这一过程中土壤水分降低,盐分分布得到进一步优化,土壤含盐量进一步降低。灌后(雨后)10 d 前后,部分处理土壤含盐量开始逐步回升。为更加直观的对比,本研究比较井灌区 5 月中至 6 月中旬两次降雨与灌水过程的洗盐效果。两次降雨日期分别为

5 月 10 日和 5 月 21 日,灌水日期为 5 月 12 日及 6 月 10 日,两次降雨过程均为小雨,远小于灌水量。期间各区域时间跨度不大,电导率初始值相差不大,地下水埋深也较稳定,各观测区雨(灌)后终值均选为 10 d 内最小电导率。经比较,两次降雨对 100 cm 以上土层脱盐作用均大于灌水过程。灌水 5 d 后,地下水灌溉过程地表返盐明显,深层土壤盐分上升不明显或有小幅度的降低。除个别点外,降雨过程表现为全深度脱盐,100 cm 以上电导率相对减少值在 0.33%~68.49%。可见,高含盐水灌溉可能造成土壤盐分短暂升高,影响压盐效果;而淡水灌溉则可能在较小的灌溉水量下受到更好的洗盐效果。

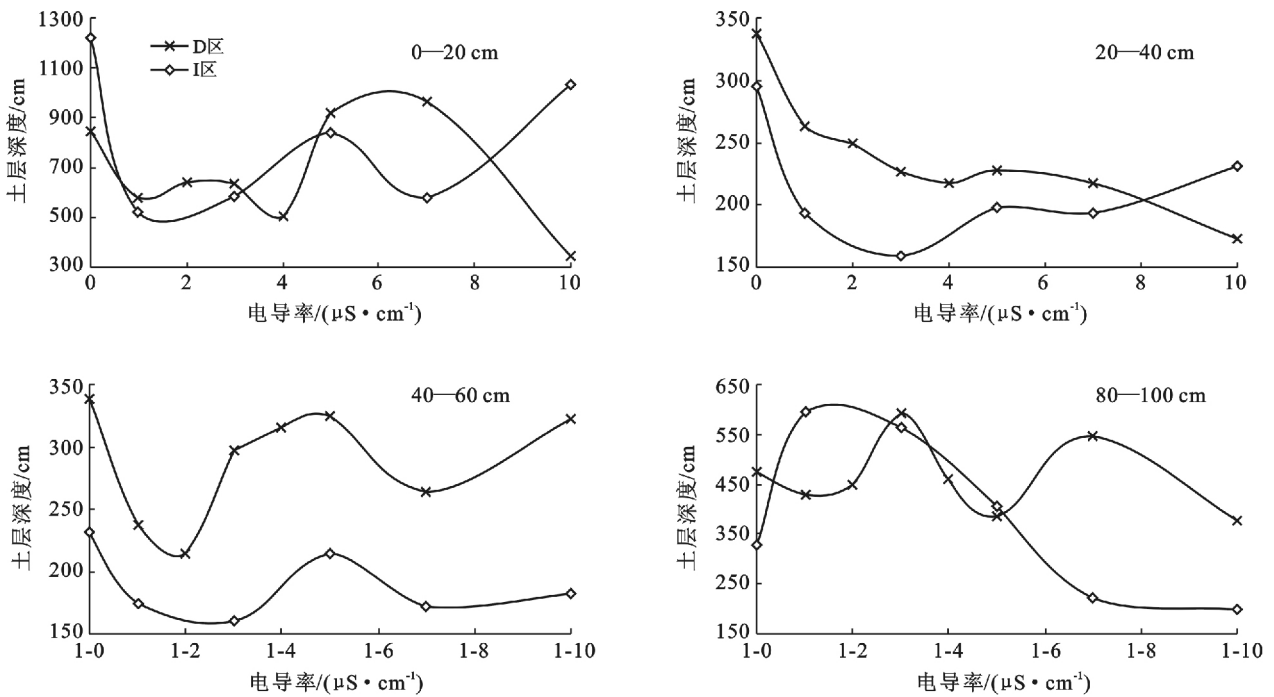


图5 雨后不同土层电导率随时间变化

### 3 结论

(1) 灌溉初期,土壤表层含盐量变化较早,含盐量影响范围一般小于 50 cm;灌后 3~5 d,各土层土壤盐分均经历了一次较明显的脱盐过程,中下层土壤含盐量逐渐下降,但幅度一般小于表层;灌后 10 d,土壤含盐量开始回升,各观测区土壤含盐量接近,甚至出现大于灌前(雨前)的情况。

(2) 耕作期内,除荒地外,测区土壤均表现为脱盐状态,荒地等地下水浅埋区域存在土壤表层盐分富集趋势。

(3) 耕作期内,除荒地外,各观测区土壤含盐量随时间逐渐减小,100 cm 以上土体平均脱盐率 17.7%,其中井灌区脱盐率最大,为 46%,渠灌区为

10.1%;荒地处理不同土层观测期内呈积盐状态,不灌或少灌区域土壤表聚趋势加强。

(4) 土壤剖面盐分与土壤含水率响应明显,土壤初始含盐量与绝对脱盐量之间具有良好的线性相关性。

(5) 地下水埋深较大的井灌区,土壤水下渗增加,脱盐速率较快于潜水位较高的渠灌区,降雨具有比井水更好的洗盐能力,较小的水量可收到更好的脱盐效果。

(6) 初始含盐量越高土壤脱盐量绝对值越大,相对脱盐率与初始含盐量之间并无明显关系,高含盐水灌溉可能造成土壤盐分短暂升高,影响压盐效果;而淡水灌溉则可能在较小的灌溉水量下受到更好的洗盐效果。

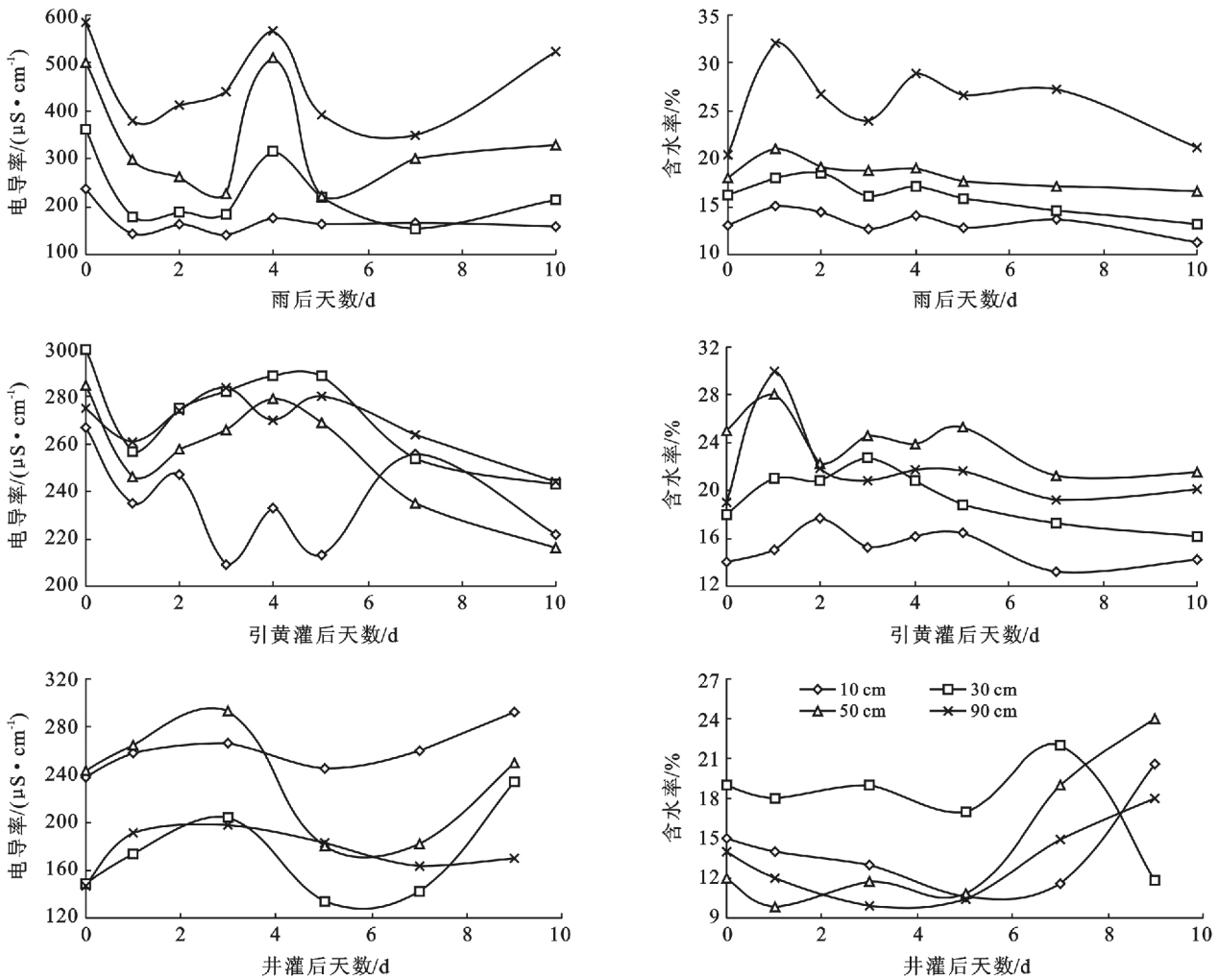


图 6 不同水质灌溉土壤盐分与含水率变化

[ 参 考 文 献 ]

[1] Saxton K E, Rawls W J. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 70(5):1569-1578.

[2] 李玮,王立,姜涛. 地下水浅埋深盐碱地滴灌条件下土壤盐分运移研究[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(9):130-135.

[3] Cemek B, Güier M, Kili C K, et al. Assessment of spatial variability in some soil properties as related to soil salinity and alkalinity in Bafra plain in northern Turkey [J]. Environmental Monitoring Assessment, 2007, 124 (1/3):223-234.

[4] Corwin, D L, Rhoades J D, Šimunek, J. Leaching requirement for soil salinity control: Steady-state versus transient models[J]. Agricultural Water Management, 2007, 90(3),165-180.

[5] Roger E J, Richard G, Dexter A R, et al. Integration of soil structure variations with time and space into models for crop management: A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2009, 29(1):135-142.

[6] Gideon O, Yole D, Leonid G. Effect of water salinity and irrigation technology on yield and quality of pear[J]. Biosystems Engineering, 2002, 81(2):237-247.

[7] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: A review[J]. Geoderma, 2005, 124(1/2):3-22.

[8] Bormann H, Klaassen K. Seasonal and land use dependent variability of soil hydraulic and soil hydrological properties of two Northern German soils[J]. Geoderma, 2008, 145(3/4):295-302.

[9] Dehghanisanig H, Agassi M, Anyoji H. Improvement of saline water use under drip irrigation system[J]. Agriculture Water Management, 2006, 85(3):1-10.

[10] 郑东峰,高贤彪,张玉兰,等. 滴灌淋洗土壤盐分效果的研究初报[J]. 山东农业科学, 1999(4):32-34.

[11] 李玉义,张凤华,潘旭东,等. 新疆玛纳斯河流域不同地貌类型土壤盐分累积变化[J]. 农业工程学报, 2007, 23 (2):60-64.

[12] 韩茜,熊黑钢. 奇台县绿洲农田土壤盐渍化影响因素及逆向演替特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23 (7):168-175.

[13] 范晓梅,束龙仓,刘高焕,等. 黄河三角洲土壤盐渍化影响因素分析[J]. 水土保持通报, 2010, 24(1):139-144.

(下转第 20 页)

- [4] Andrade J L, Meinzer F C, Goldstein G, et al. Regulation of water flux through trunks, branches, and leaves in trees of a lowland tropical forest [J]. *Oecologia*, 1998, 115(4): 463-471.
- [5] Wullschlegel S D, Meinzer F C, Vertessy R A. A review of whole-plant water use studies in trees [J]. *Tree Physiology*, 1998, 18(8/9): 499-512.
- [6] Kellomki S, Wang K Y. Sap flow in Scots pines growing under conditions of year-round carbon dioxide enrichment and temperature elevation [J]. *Plant Cell and Environment*, 1998, 21(10): 969-981.
- [7] Wullschlegel S D, Norby R J. Sap velocity and canopy transpiration in a sweetgum stand exposed to free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE) [J]. *New Phytologist*, 2001, 150(2): 489-498.
- [8] Gong Daozhi, Kang Shaozhong, Lu Zhang, et al. A two-dimensional model of root water uptake for single apple trees and its verification with sap flow and soil water content measurements [J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 83(1): 119-129.
- [9] Smith D M, Allen S J. Measurement of sap flow in plant stems [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1996, 47(305): 1833-1844.
- [10] Gazal R M, Scott R L, Goodrich D C, et al. Controls on transpiration in a semiarid riparian cotton wood forest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 137(1): 56-67.
- [11] 郭树江, 徐先英, 杨自辉, 等. 干旱荒漠区沙冬青茎干液流变化特征及其与气象因子的关系 [J]. *西北植物学报*, 2011, 31(5): 1003-1010.
- [12] 乌日娜, 丁国栋, 吴斌, 等. 沙木蓼蒸腾耗水特性及环境影响因子研究 [J]. *水土保持通报*, 2012, 32(3): 68-72.
- [13] 王文, 朱焯, 诸葛绪霞, 等. 尾巨桉树干液流特性及其影响因子分析 [J]. *水土保持通报*, 2013, 33(3): 159-164.
- [14] 黄磊, 张志山, 周小琨, 等. 沙漠人工植被区柠条树干液流变化及影响因子分析 [J]. *中国沙漠*, 2011(2): 415-419.
- [15] 苏里坦, 玉米提, 宋郁东. 基于改进 BP 神经网络的干旱区李伟腾发量预测模型 [J]. *干旱区地理*, 2011, 34(4): 551-557.
- [16] 蒋文伟, 郭运雪, 杨淑贞, 等. 天目山柳杉树干液流动态及其与环境因子的关系 [J]. *江西农业大学学报*, 2011, 35(5): 899-905.
- [17] 赵敏丽, 刘普幸, 朱小娟, 等. 近 51 年来额济纳旗绿洲胡杨年生长期对气候变化的响应 [J]. *水土保持通报*, 2012, 32(5): 205-209.
- [18] 王文杰, 孙伟, 邱岭, 等. 不同时间尺度下兴安落叶松树干液流密度与环境因子的关系 [J]. *林业科学*, 2012, 48(1): 77-85.
- [19] 郭跃, 丁国栋, 吴斌, 等. 毛乌素沙地沙木蓼茎干液流规律研究 [J]. *水土保持通报*, 2010, 30(5): 22-26.
- [20] 曹晓明, 陈曦, 王卷乐, 等. 古尔班通古特沙漠南缘非灌溉条件下梭梭 (*Haloxylon ammodendron*) 蒸腾耗水特征 [J]. *干旱区地理*, 2013, 36(2): 292-302.
- [21] 司建华, 常宗强, 苏永红, 等. 胡杨叶片气孔导度特征及其对环境因子的响应 [J]. *西北植物学报*, 2008, 28(1): 125-130.

(上接第 14 页)

- [14] 杨劲松, 姚荣江, 姜龙. 黄河下游三角洲盐渍区表层土壤积盐影响因子及其强度分析 [J]. *土壤通报*, 2008, 39(5): 1116-1119.
- [15] Northey J E, Christen E W, Ayars J E, et al. Occurrence and measurement of salinity stratification in shallow groundwater in the Murrumbidgee irrigation area [J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 81(1/2): 23-40.
- [16] Rengasamy P. Transient salinity and subsoil constraints to dryland farming in Australian sodic soil: An overview [J]. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 2002, 42(3): 351-361.
- [17] 蒋静, 冯绍元, 王永胜, 等. 灌溉水量和水质对土壤水盐分布及春玉米耗水的影响 [J]. *中国农业科学*, 2010, 43(11): 2270-2279.
- [18] 雷廷武, 肖娟, 詹卫华, 等. 沟灌条件下不同灌溉水质对玉米产量和土壤盐分的影响 [J]. *水利学报*, 2004, 9(9): 118-122.
- [19] Maggio A, De Pascale S, Ruggiero C, et al. Physiological response of field-grown cabbage to salinity and drought stress [J]. *European Journal of Agronomy*, 2005, 23(1): 57-67.
- [20] Reina S A, Romero A R, Cuartero J. Plant water uptake and water use efficiency of greenhouse tomato cultivars irrigated with saline water [J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 78(1/2): 54-66.