doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.022

覆膜滴灌条件下棉花根层土壤盐分时间稳定性研究*

邢旭光^{1,2} 赵文刚^{1,2} 马孝义^{1,2} 赵 伟³ 史文娟⁴

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西杨凌 712100;

3. 汉中市水利水电建筑勘测设计院, 汉中 723000; 4. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048)

摘要:为揭示膜下滴灌棉田主根区土壤盐分的时间变异特性,基于 2013—2014 年田间实测数据,采用变异系数、平均相对偏差和标准差等方法研究了不同土层土壤盐分的时间稳定性,并进一步确定了可以反映各土层土壤平均含盐量的代表性测点。结果表明,研究区域 0~40 cm 土层土壤盐分随时间序列的变异性只有少数几个测点属于强变异,其余均属于中等变异;在棉花主根层(40 cm)内,土壤盐分的时间稳定性随土层深度增加呈现先增强后略微减弱趋势,在 30 cm 土层深度稳定性最强,平均相对偏差浮动范围最小、且其平均标准差最小;反映各土层平均含盐量的代表测点分布较为集中,可选取代表地块对区域土壤含盐量进行估算(决定系数 R²为 0.791 2~0.917 1)。棉田 主根层土壤盐分时间稳定性研究有利于指导田间灌溉;选取少量且具有代表性的测点可为区域合理布设土壤盐分 监测点提供理论依据。

关键词:棉花 覆膜滴灌 土壤盐分 时间稳定性 相对偏差 变异系数 中图分类号: S152.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)07-0146-08

Temporal Stability of Soil Salinity in Root Zone of Cotton under Drip Irrigation with Plastic Mulch

Xing Xuguang^{1,2} Zhao Wengang^{1,2} Ma Xiaoyi^{1,2} Zhao Wei³ Shi Wenjuan⁴

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Key Laboratory for Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area, Ministry of Education,

Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. Water Conservancy and Hydropower Construction Survey and Design Institute, Hanzhong 723000, China

4. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi' an University of Technology, Xi' an 710048, China)

Abstract: To explore the spatial variability of soil salinity at root zone in cotton field under plastic drip irrigation, we conducted field experiments in 2013 and 2014 and employed the coefficient of variation, mean relative deviation and standard deviation to investigate the spatial variability of soil salinity for $0 \sim 5 \text{ cm}$, $5 \sim 10 \text{ cm}$, $10 \sim 15 \text{ cm}$, $15 \sim 20 \text{ cm}$, $20 \sim 30 \text{ cm}$ and $30 \sim 40 \text{ cm}$ layers, and further confirmed representative points that well reflected average soil salinity for each layer. Results showed that for $0 \sim 40 \text{ cm}$ depth, variation degree of soil salinity of only a few points were strong, and most points were medium. Furthermore, in this main root zone, temporal stability of soil salinity first obviously increased and then slightly decreased with increasing of depth. Its stability was the strongest in 30 cm depth under surface, with the smallest floating range of mean relative deviation and the smallest mean standard deviation. Based on these findings, some representative points could be selected to estimate average soil

收稿日期: 2015-04-16 修回日期: 2015-05-24

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51379173、51279167)、"十二五"国家科技支撑计划资助项目(2012BAD08B01)和水利部公益性行业科研 专项资助项目(201301016)

作者简介:邢旭光,博士生,主要从事土壤水-盐-热迁移监测与模拟研究,E-mail: xingxg86@163.com

通讯作者:马孝义,教授,博士生导师,主要从事农业水土、电气研究, E-mail: xiaoyima@ vip. sina. com

salinity for $0 \sim 5$ cm, $5 \sim 10$ cm, $10 \sim 15$ cm, $15 \sim 20$ cm, $20 \sim 30$ cm and $30 \sim 40$ cm layers, and the spatial distribution of the selected points was concentrated. Besides, the relationship between the salinity of representative points and that of the whole area showed a good linear correlation, with high accuracy and determination coefficient from 0. 791 2 to 0. 917 1. This research on temporal stability of soil salinity in main root zone can help to guide the field irrigation. And selecting as few representative points as possible can provide a theoretical basis for observation points of soil salinity in this region.

Key words: Cotton Drip irrigation with plastic mulch Soil salinity Temporal stability Relative deviation Coefficient of variation

引言

土壤盐分具有时空变异性。在盐碱化严重地 区,土壤盐分的时空变异特性在诸多农业类学科中 均为研究热点^[1]。我国新疆地区土壤盐碱化严重, 在地下水位较高地区,在强烈蒸发作用下,极易导致 根区积盐,产生盐分胁迫从而威胁棉花生长,因此对 棉花主根系区盐分在整个生育期内的变异程度进行 研究具有重要意义,可为农田土壤环境治理提供科 学依据,同时可为制定合理的灌溉制度提供参考。

纵观目前有关土壤性质时空变异性的研究成 果,较多集中在空间变异方面,并且多是将常规土壤 物理特性参数^[2-4]和土壤养分^[5-7]作为研究对象, 相比较而言,在时间变异性方面略有匮乏,尤其在土 壤盐分时间稳定性方面的研究更是鲜有报道。欲得 到更可靠且稳定的土壤盐分时空分布模式,有必要 对土壤盐分的时间稳定性进行研究^[8],与此同时, 对于重盐碱化地区,开展根区土壤盐分在作物生育 期内的时间稳定性研究,有利于明晰根层土壤盐分 随时间序列的变化规律,为防治土壤盐碱化提供 参考。然而,基于大田的土壤盐分的变异性研究 往往需要大量观测数据且布置大量监测点,因此, 在不丢失必要信息的前提下,选取具有代表性的 监测点对研究区土壤平均含盐量进行评估具有重 要研究价值:研究土壤盐分的时间稳定性,将时间 稳定性较好的点作为代表测点则有利于解决上述 问题^[9-10]。

新疆地区土壤盐碱化程度高,棉花长期受土壤 盐分威胁,并且夏季高温少雨,在强烈蒸发环境下, 土壤中可溶性盐随土壤水从深层向浅层移动,逐渐 在根层积累,使得作物根区渗透压增加,导致作物吸 水困难甚至死亡^[11],因此,土壤盐分在作物生长过 程中发挥重大影响。基于此,本研究重点以土壤盐 分作为研究对象、以探索灌溉条件下的土壤盐分变 化特性为目的,对棉花主根层(0~40 cm)土壤盐分 随棉花生长的时间变异性展开分析,利用相对偏差 和变异系数等方法,研究区域内不同土层土壤盐分 随时间的变化动态及其时间稳定性,进而确定研究 区域内各土层土壤平均含盐量的代表性测点,以期 为该区域合理布设监测点以及完善灌溉制度和田间 管理提供理论依据和参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区库尔勒市西尼尔镇位于新疆塔里木河流 域巴音郭楞蒙古自治州(41°36′N,86°12′E),处于 天山南麓塔里木盆地边缘孔雀河冲积平原带,属暖 温带大陆性荒漠气候。长年干旱少雨而蒸发强烈, 气候干燥,昼夜温差大。多年平均降雨量仅60 mm, 潜在年蒸发量高达2788 mm,年日照时数3036 h,年 平均气温11.48℃,大于等于10℃积温4121℃,无 霜期191 d。该地区耕地属旱作类型,均种植棉花, 灌溉水来自孔雀河,矿化度约为0.70 g/L;研究区域 土壤颗粒组成列于表1,试验期间地下水埋深为2.5~ 3.0 m,矿化度约为2.05 g/L。

表1 0~40 cm 土层土壤颗粒组成

| 1 abit 500 meenamear composition for 0 40 cm 50 | Tab. 1 | Soil mechanical | composition | for (| $0 \sim 40$ | cm | soi |
|---|--------|-----------------|-------------|-------|-------------|----|-----|
|---|--------|-----------------|-------------|-------|-------------|----|-----|

| 土层 | 土壤 | 土壤颗 | 顺粒质量分 | 土壤容重/ | |
|--------------|-----|-------|-------|-------|---------------------|
| 深度/cm | 质地 | 砂粒 | 粉粒 | 粘粒 | $(g \cdot cm^{-3})$ |
| $0 \sim 10$ | 壤土 | 52.12 | 40.06 | 7.82 | 1.686 |
| $10 \sim 20$ | 粉壤土 | 42.69 | 50.80 | 6.51 | 1.737 |
| $20 \sim 30$ | 粉壤土 | 41.53 | 51.21 | 7.26 | 1.683 |
| $30 \sim 40$ | 粉壤土 | 40.40 | 51.13 | 8.47 | 1.661 |

注:土壤质地根据"国际制土壤质地三角形"确定;土壤容重采 用环刀法测定。

1.2 试验设计

土壤采自棉田,研究区域内棉田种植年限至少在10 a 以上,采样贯穿棉花全生育期,所采用的灌溉制度和田间管理与当地实际生产保持一致;在棉花播种前,采用大水漫灌方式进行春灌,为棉花出苗、生长创造良好的水盐环境。田间试验于2013—2014年5—9月份进行,2年内播种日期分别为5月1日和5月4日,在2013年和2014年生长期间均共灌水10次,灌水定额37.5~52.5 mm,灌溉定额均

为 420 mm;2 年内的具体灌水日期分别为 2013 年 6月 27日、7月5日、7月13日、7月22日、7月 27日、8月7日、8月12日、8月17日、8月22日和 8月30日;2014年6月27日、7月4日、7月11日、 7月20日、7月24日、7月30日、8月5日、8月 12日、8月17日和8月24日。依据"灌水前后取 土"原则,且基于灌水日期,确定2013年和2014年 均共取土9次,具体采样日期分别为2013年6月 24日、6月30日、7月20日、7月29日、8月15日、 8月19日、8月27日、9月2日和9月8日;2014年 6月23日、6月29日、7月16日、7月27日、8月 9日、8月14日、8月22日、8月25日、9月2日。试 验期间降雨量微小,对试验无影响,可以忽略。

田间棉花为覆膜种植,采用"一膜两管四行"方 式,行距配置为 20 cm + 40 cm + 20 cm,株距 10 cm, 滴头间距 30 cm,每块条田长度 10 m、宽度 1.1 m, 2 块条田间隔(即膜间) 30 cm,以尺寸为 10 m × 12.5 m 的矩形区域作为试验区;取土点位于薄膜正 中以及膜间,共计 36 个膜下取样点、18 个膜间取样 点,取样分布图如图 1 所示。采用土钻取土,取样深 度为棉花主根系层:0~5 cm、5~10 cm、10~15 cm、 15~20 cm、20~30 cm 和 30~40 cm;用电导率仪 (DDS – 307 型)测定土水比 1:5(体积比)的土壤浸 提液电导率值($R_{\rm EC}$,mS/cm),并转化为土壤含盐量 (S,g/kg)(图 2)。



图 1 土壤含盐量测试点分布图







1.3 评价指标

1.3.1 变异系数

变异系数 C_v反映的是相对变异,即随机变量的 离散程度,即

$$C_v = \sigma/\mu \tag{1}$$

式中 *σ*——样本标准差 *μ*——样本均值

根据变异系数可将土壤含盐量的变异程度分为 3 类,即弱变异($C_v \leq 0.1$)、中等变异($0.1 < C_v < 1$)、强变异($C_v \geq 1$)^[12]。

1.3.2 相对偏差

其中

任意某测点 $i \pm j$ 时土壤盐分(S_{ij})的相对偏差 (δ_{ij})可表示为

$$\boldsymbol{\delta}_{ij} = (S_{ij} - \overline{S}_j) / \overline{S}_j \tag{2}$$

$$\overline{S}_{j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} S_{ij}$$
(3)

式中 n——测点总数

则任意一点 i 处土壤含盐量的平均相对偏差 $(\bar{\delta}_i)$ 和平均相对偏差的标准偏差 $(\sigma(\delta_i))$ 分别为

$$\bar{\delta}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \delta_{ij} \tag{4}$$

$$\sigma(\delta_i) = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (\delta_{ij} - \overline{\delta_i})^2}$$
(5)

式中 m——试验总测定次数

2 结果与分析

2.1 土壤盐分随时间的变化特征

在 2013—2014 年,棉花主根层各土层土壤含盐 量随时间呈现较好的一致性(图3);膜间 0~40 cm 土 层内平均含盐量比膜下高出 20% 以上,体现了薄膜 抑制盐分的作用。试验初期,膜下土壤含盐量表现 出随深度增加而降低的趋势(图 3b、3c),随着棉花 生长,上层土壤盐分主要被淋洗至 30~40 cm 深度; 在灌溉作用下,膜间土壤盐分分布呈现出一定的 "底聚性",表层(0~5 cm)土壤脱盐效果最为显著 (图 3a),脱盐率高达 46%。在很大程度上有效预 防了土表积盐导致盐碱化加剧;另一方面,随着棉花 生长,膜间土壤 40 cm 土层脱盐的同时,其盐分分布

从图 3b、3c 可以看出,0~5 cm、5~10 cm、10~ 15 cm、15~20 cm、20~30 cm 和 30~40 cm 土层膜 下土壤盐分的变异系数分别介于 0.5751~1.2046、 0.5277~1.0385、0.5366~0.8988、0.5970~ 0.9015、0.6071~0.8298和 0.4901~1.2184,只 有个别点土壤盐分的时间变异程度属于强变异 $(C_v \ge 1)$,其余都属于中等变异 $(0.1 < C_v < 1)$;纵观 棉花全生育期,膜下土壤含盐量的变异系数波动不





大、较为稳定,显示出膜下土壤盐碱地覆膜种植可以 有效维持膜下土壤盐分含量稳定;同时可以看出, 0~20 cm 土层土壤盐分随棉花生长表现出相同变 化特征,即在蕾期至花铃期前期,变异系数变化幅度 较大,随后各土层变异系数差异减小。分析其原因 认为:从播种到苗期结束(5月1日-6月15日)期 间无灌溉,在蒸发作用下,浅层土壤累积了大量盐 分,因此开始进行灌溉时,浅层土壤含盐量变化显 著,导致其变异系数波动剧烈;进入花铃期时,棉花 需水量增大,因此灌水次数和灌水定额均有增加,以 至浅层土壤含盐量变幅较之前有所减小,使得其变 异系数有所减小且各土层相差不大,此时期内 20 cm 土层基本呈现脱盐趋势(图 3b、3c);进入吐絮期 后,灌溉次数和灌水定额均减少,因此0~20 cm 土 层土壤含盐量再次出现明显变化,导致其变异系数 增大,且略显积盐(图 3b、3c)。与0~20 cm 土层相 比,20~40 cm 土层土壤盐分的变异系数表现得更 为稳定(图 3b、3c)。从图 3a 可以看出,0~5 cm、 5~10 cm、10~15 cm、15~20 cm、20~30 cm 和 30~

40 cm 土层 膜间 土壤 盐分的 变异系数分别介于 0.5191~0.9911、0.5261~0.8920、0.4926~ 0.7497、0.3513~0.9068、0.3902~1.1668和 0.7954~1.1550之间,与膜下土壤类似,大部分测 点均属于中等变异;而与其不同的是,膜间土壤含盐 量的变异系数变化幅度较大。

在实际大田中,盐分的变异性与灌水、作物生长 以及土壤物理特性等诸多因素有关,但在覆膜滴灌 条件下,蒸发主体上边界条件发生改变,从而导致膜 下土壤盐分积累被削弱;膜间土壤暴露于空气之中, 在强烈的蒸发作用下,引发膜下土壤水发生侧向运 动,导致膜间土壤盐分增加^[13]。图 3b、3c 显示出, 20~30 cm 土层含盐量较 30~40 cm 土层高,表明在 此灌溉定额条件下,上层土壤中的可溶性盐较多被 淋洗至 30 cm 深度;20~40 cm 土层脱盐效果不显 著,甚至出现微弱积盐趋势,可以看出 20~40 cm 土 层盐分受浅层影响不明显,这从表 2 得到证实;对比 分析图 3a、3b、3c 可知,正是由于覆膜蒸发体为土壤 水盐提供了相对稳定的运移环境,使得膜下土壤盐 分的变异系数波动不剧烈。从图 3b、3c 可以看出, 20~40 cm 土层膜下土壤含盐量的变异系数比浅层 浮动小,且随时间序列波动微弱;在 0~40 cm 土层 内,土壤含盐量的变异系数随深度增加呈现先减小 后增大趋势,且在 20~30 cm 土层达到最小,这是因 为在棉花生长期内,当前灌水定额使得盐分主要被 淋洗至 30 cm 土层深度,但仍存在少量水分携盐分 继续入渗,在这种情况下,40 cm 深度土层自身含盐 量的变化较为显著。同时从表 2 亦可看出,20 ~ 40 cm 土层土壤含盐量的变异系数与0~20 cm 土层 相关性并不显著;上层土壤盐分平均值以及变异系 数之间的相关性较强,这是受强烈的蒸发影响,而下 层土壤盐分平均值以及变异系数之间的相关性较弱。

| | 表 2 | 201 | 4 年 | 不同土原 | まし ちょうしん こうしょう しんしょう しんしょ しんしょ | 襄平均含盐 | 量 | 和变异系统 | 数材 | 目关性 | | | | |
|-------------|------|--------|------|----------|--|-------------|----|-----------|----|-----------|------|--------|----|------|
| Correlation | of a | verage | soil | salinity | and | coefficient | of | variation | at | different | soil | lavers | in | 2014 |

| 土层深度/cm 0~5 5~10 10~15 15~20 20~30 30~4 1 0.945**/0.927** 0.917**/0.866** 0.652/0.841*** 0.201/0.634 -0.218/0 | 0 . 443 |
|---|------------|
| 1 0.945 **/0.927 ** 0.917 **/0.866 ** 0.652/0.841 ** 0.201/0.634 -0.218/0 | . 443 |
| 0 5 | |
| $(1) \qquad (0.764*/0.006) \qquad (0.694*/0.487) \qquad (-0.068/0.275) \qquad (-0.263/-0.307) \qquad (-0.234/0.275)$ | . 229) |
| 1 0.977 * */0.897 ** 0.771 * /0.842 ** 0.366/0.514 -0.073/0 | . 294 |
| $(1) \qquad (0.875^{**}/0.427) \qquad (0.349/0.214) \qquad (-0.001/-0.201) \qquad (0.110/-0.201)$ | . 330) |
| 1 0. 864 **/0. 842 ** 0. 518/0. 595 -0. 010/0 | . 140 |
| $(1) \qquad (0.462/0.373) \qquad (0.231/-0.174) \qquad (0.254/-0.174)$ | . 195) |
| 1 0.719*/0.600 0.031/0. | 548 |
| $(1) \qquad (0.654/0.698^{*}) \qquad (0.486/0.$ | 475) |
| 1 0.551/0. | 568 |
| (1) (0.528/0. | 617) |
| 30 40 | |
| 50 ~ 40 (1) | |

注:无括号表示膜下,有括号表示膜间;"/" 左和右分别代表相应土层土壤平均含盐量之间以及变异系数之间的相关性;"**" 和"*" 分别 代表在 0.01 和 0.05 水平(双侧)上显著相关。

2.2 土壤盐分时间稳定性分析

Tab. 2

为更深入了解棉田主根层盐分变化动态及其在 生育期内的稳定性,分别对棉花主根区(0~40 cm) 土壤含盐量进行时间稳定性研究(图4)。图4显示 了棉花主根层内盐分的时间稳定性;根据式(2)~ (5)确定 36 个膜下测点的平均相对偏差,并按升序 排列,同时确定各测点对应的标准差,在图 4 中,误 差线即为平均相对偏差的标准差。



图 4 各测点不同埋深土壤含盐量平均相对偏差及标准差

Fig. 4 Mean relative difference and standard deviation of soil salinity for different layers of each sampling

 $(a) \ 0 \sim 5 \ {\rm cm} \quad (b) \ 5 \sim 10 \ {\rm cm} \quad (c) \ 10 \sim 15 \ {\rm cm} \quad (d) \ 15 \sim 20 \ {\rm cm} \quad (e) \ 20 \sim 30 \ {\rm cm} \quad (f) \ 30 \sim 40 \ {\rm cm}$

由图 4 可以看出,0~5 cm、5~10 cm、10~ 15 cm、15~20 cm、20~30 cm 和 30~40 cm 土层膜 下土壤盐分平均相对偏差分别介于-80.27%~ 92.61%、-78.63% ~79.32%、-73.19% ~ 73.01%、-69.99% ~64.62%、-38.75% ~ 32.06%、-40.78% ~35.55%之间(2013年),以及

 $-83.63\% \sim 93.20\% = 75.20\% \sim 83.32\%$ $-72.36\% \sim 64.62\%$ $-67.19\% \sim 60.84\%$ -60.59%~58.44%、-62.74%~59.25%之间 (2014年)。由此可知,随着土层厚度增加,土壤盐 分平均相对偏差的波动范围基本呈现减小趋势,在 浅层(0~20 cm)表现得尤为明显,而 20~30 cm 土 层土壤盐分平均相对偏差比 30~40 cm 土层小,表 明该层土壤含盐量随时间的稳定性最好,与图 3b、 3c 一致。各土层土壤盐分平均相对偏差标准差的 均值分别为 26.16%、25.91%、25.16%、24.44%、 19.46%、19.95% (2013 年), 以及 28.77%、 28. 22% 26. 92% 24. 56% 18. 60% 19. 66% (2014年),即随土层深度增加,土壤盐分平均相对 偏差的标准差亦大体呈现减小趋势,与前类似,该值 在 20~30 cm 土层最小。上述结果表明,土壤盐分 的时间稳定性在一定土层深度内随着土层深度的增 加而增强,但随着深度继续增加,土壤盐分的时间稳 定性略微减弱,本研究中,在棉田主根层 40 cm 内, 20~30 cm 土层土壤含盐量的时间稳定性最强。

2.3 代表测点的选取及合理性检验

代表测点土壤含盐量/(g·kg⁻

1

平均相对偏差的标准差可以反映测点土壤含盐

量的时间稳定性,其值越小、相对偏差越接近于零, 则说明该测点土壤盐分的时间稳定性越好^[8],因 此,依据"平均相对偏差接近零、标准差较小"的原 则,为各土层选取代表测点对土壤盐分平均值进行 估算。基于此,由图4可知,0~5 cm、5~10 cm、 10~15 cm、15~20 cm、20~30 cm 和 30~40 cm 等 6个土层均可用不同测点(图1)所对应土层的土壤 含盐量进行估算。

通过将各代表测点的土壤含盐量与各土层土壤 平均含盐量进行对比后发现,各测点含盐量均在土 壤盐分均值附近小幅浮动(图5)。采用最小二乘法 对所选取的具有代表性的测点与相应土层土壤含盐 量进行统计回归分析,在0~5 cm、5~10 cm、10~ 15 cm、15~20 cm、20~30 cm 和 30~40 cm 土层内,回 归方程的决定系数 R^2 分别为 0.837 6/0.914 7、 0. 800 7/0. 881 2 0. 791 2/0. 859 2 0. 900 5/0. 860 5 0.915 1/0.871 1、0.917 1/0.883 6 (2013 年/ 2014 年)。说明选取的测点具有一定代表性,各土层 代表测点的含盐量与其对应土层土壤平均含盐量的 相关性较高、差异较小。





3 讨论

本研究中,垂直采样间距采取"细分法",即以 5~10 cm 为间隔,相对于传统的 10~20 cm 间隔是 一种改进,同时考虑到新疆地区耕地土壤盐碱化严 重、在强烈的蒸发和根系吸水作用下极易导致根层 积盐、作物出苗受表层盐分威胁^[14]。另一方面,史 文娟等^[13]研究指出,该区域内,60 cm 土层土壤盐分 的变异性随着尺度的缩小(≤20 m×20 m)而减弱; 本研究根据田间棉花种植特点,确定研究区域规模 为10m×12.5m,可视为微尺度,所以可近似认为 40 cm 土层土壤盐分的变异性为弱变异。在此基础 上对其进行时间变异性研究更为合理,研究结果更 为可靠。由此看出,在时间稳定性分析中,代表测点 应是基于弱空间变异强度而选取,即对某区域进行 时间稳定性研究时,在选取代表性测点之前,应确定 该区域空间变异强度是否为弱变异。

本研究中,土壤盐分的时间稳定性并未完全体 现出随深度增加而增强的趋势,即在0~40 cm 土层 中,土壤盐分的时间稳定性表现出先增强后略微减 弱的变化特点,在20~30 cm 土层最稳定;通过与潘 颜霞等^[15]、张继光等^[16]和刘继龙等^[1]的研究对比 发现,取土分层间隔是影响土壤水分和盐分时间稳 定性的重要因素,即间隔过大不利于体现土壤水分 及盐分的时间变异性,尤其在新疆这种降雨量微小、 蒸发量极大且盐碱土壤地区,研究土壤物理特性时,

更应该缩小取土间隔。郝振纯等^[17]研究表明, 30 cm 土层内,夏季土壤水分变异系数基本维持不 变,表现出较强的稳定性,与其类似,本研究却表明, 在棉花整个生育期内,夏季各月份根层内各土层土 壤盐分的变异系数均出现不同程度浮动(图 3b、 3c)。形成这种差异的主要原因在于气象要素,即 新疆地区蒸发强烈,土壤水分携带盐分运动,而盐分 反过来亦会影响水分再分布,彼此相互影响导致盐 分的变异性较难维持稳定。关于不同气象因子对土 壤水盐时间稳定性的影响需要进一步研究。另一方 面,通过灌溉可以有效降低根层土壤盐分的变异系 数(图 3b、3c),这与李宝富等^[18]的研究结果一致, 这表明灌溉既可以有效淋洗棉花根层盐分(图 3b、 3c),也可以维持根层土壤盐分的稳定性,对作物生 长具有重要作用;同时也进一步印证了本文开展根 层土壤盐分随棉花生长的时间稳定性研究的科学性 和重要性。对于盐碱土而言,土壤水分和盐分难以 分割,在研究土壤水分时空异质性^[19-20]的同时,不 应忽略盐分的变异特性。

本研究针对棉花主根系层土壤含盐量选取代表 性测点对其进行估算,回归分析表明,所选取的代表 测点可以较好地反映相应土层的土壤含盐量 (图5),这具有重要意义:首先,"选取代表测点"是 稳定性分析研究中的一项重要内容,该结论表明,根 据测点的相对偏差及其标准差可以很好地判断其稳 定性的强弱,稳定性较强的测点则可以作为代表性 测点,从而明显减小田间工作量,提高工作效率;其 次,本研究中,根据棉花实际种植特点选出试验区域 为10m×12.5m(微尺度),且各土层都可以选取出 具有代表性的测点,可以指导农业生产。对比 图 5a、5b 可以发现,不同年份所选取的代表测点不 完全相同,这是缘于该研究区域土壤盐分的弱空间 变异性[13];但同时看出,选取的代表测点的位置分 布非常集中,即测点9、10相邻,测点21~23、27~ 29 这 6 个测点较为密集(图 1)。据此,可对该研究 区域进一步进行网格划分,采用代表性地块对整个 区域土壤含盐量进行评估。更重要的是,本文研究 结果更是为小尺度、中尺度以及大尺度研究奠定理 论基础并提供指导:对于田间作物,选取少量代表性 测点反映较大区域土壤性质是必要的,基于本文研 究结果,结合 GPS 和 Google Earth 等技术^[20]对代表 点进行定位并进行实时、长期、固定监测^[21],使得监 测点的布置更具合理性,同时既可以很大程度减小 采样点的随机性,也可以增强数据的连续性。

本文是基于棉花的2个生长期展开研究,而在 时间稳定性分析时,建议考虑更长时间序列;同时, 在充分考虑当地农田田间管理(比如灌水日期、灌 水定额、灌溉方式、春灌或冬灌等)前提下,应尽量 保证采样时间间隔的均匀性。另一方面,有关土壤 盐分时间稳定性的研究应广泛开展。

4 结论

(1)随着棉花生长,主根层(40 cm)内土壤盐分存在不同程度的时间变异性,0~5 cm、5~10 cm、10~15 cm、15~20 cm、20~30 cm 和 30~40 cm 土 层土壤盐分的变异系数分别介于 0.575 1~1.204 6、 0.527 7~1.038 5、0.536 6~0.898 8、0.597 0~ 0.901 5、0.607 1~0.829 8、0.490 1~1.218 4 之间, 只有个别测点土壤盐分随时间的变异程度属于强变 异,而大部分属于中等变异。

(2) 在棉花主根层(40 cm)内,土壤盐分的时间 稳定性较好地呈现出随土层深度增加先增强后减弱 的趋势,在 20~30 cm 土层表现出最强的稳定性,该 层土壤盐分的平均相对偏差变化幅度最小,且其标 准差最小。

(3)综合考虑土壤盐分的平均相对偏差及其标准差,0~5 cm、5~10 cm、10~15 cm、15~20 cm、20~30 cm和 30~40 cm 土层土壤平均含盐量可分别选取试验区内测点9~10、21~23、27~29 进行估算,代表测点和相应土层盐分均值之间满足较好的线性关系,估算精度较高(R²为0.791 2~0.917 1)。

参考文献

- 刘继龙,马孝义,张振华,等. 果园土壤水分时间稳定性研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2014,22(4):698 704.
 Liu Jilong, Ma Xiaoyi, Zhang Zhenhua, et al. Temporal stability of soil moisture in an orchard [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2014,22(4):698 704. (in Chinese)
- 2 王卫华,王全九,张志鹏.流域尺度土壤导气率空间分布特征与影响因素分析[J].农业机械学报,2014,45(7):118-124. Wang Weihua, Wang Quanjiu, Zhang Zhipeng. Basin scale spatial distribution of soil air permeability and analysis of its impact factors [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(7):118-124. (in Chinese)
- 3 聂卫波,费良军,马孝义.区域尺度土壤入渗参数空间变异性规律研究[J].农业机械学报,2011,42(7):102-108.
- Nie Weibo, Fei Liangjun, Ma Xiaoyi. Spatial variability of infiltration parameters at the region scales [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7):102-108. (in Chinese)
- 4 高会议,郭胜利,刘文兆,等.不同施肥土壤水分特征曲线空间变异[J].农业机械学报,2014,45(6):161-165.

Gao Huiyi, Guo Shengli, Liu Wenzhao, et al. Spatial variability of soil water retention curve under fertilization practices in aridhighland of the Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6):161-165. (in Chinese)

- 5 贾玉华,邵明安.黄土区撂荒地土壤全磷的小尺度空间变异研究[J].土壤通报,2014,45(1):116-122. Jia Yuhua,Shao Ming'an. Micro-scale spatial variability of soil total phosphorus in abandoned farm land on the northern loess plateau [J]. Chinese Journal of Soil Science,2014,45(1):116-122. (in Chinese)
- 6 王勤,刘广军,张凯,等. 合肥老城区绿地土壤 pH 和氮磷的空间变异特征[J]. 长江流域资源与环境,2014,23(8):1173-1178. Wang Qin,Liu Guangjun,Zhang Kai, et al. Spatial variability of soil pH, nitrogen and phosphorus of urban greenland in central Hefei [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2014,23(8):1173-1178. (in Chinese)
- 7 刘杨,孙志梅,杨军,等. 京东板栗主产区土壤氮磷钾的空间变异[J]. 应用生态学报,2010,21(4):901-907. Liu Yang,Sun Zhimei,Yang Jun, et al. Spatial variability of soil N, P, and K in main production area of Castanea mollissima [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2010,21(4):901-907. (in Chinese)
- 8 白一茹,邵明安.黄土高原雨养区坡面土壤蓄水量时间稳定性[J].农业工程学报,2011,27(7):45-50. Bai Yiru,Shao Ming'an. Temporal stability of soil water storage on slope in rain-fed region of Loess Plateau [J]. Transactions of the CSAE,2011,27(7):45-50. (in Chinese)
- 9 Gao L, Shao M A. Temporal stability of shallow soil water content for three adjacent transects on a hillslope [J]. Agricultural Water Management, 2012, 110:41 - 54.
- 10 Hu W, Shao M A, Han F P, et al. Watershed scale temporal stability of soil water content [J]. Geoderma, 2010, 158(3-4): 181-198.
- 11 Bezborodov G A, Shadmanov D K, Mirhashimov R T, et al. Mulching and water quality effects on soil salinity and sodicity dynamics and cotton productivity in Central Asia [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2010, 138(1-2):95-102.
- 12 王卫华,王全九.黑河中游绿洲麦田土壤导气率空间变异尺度性研究[J].农业机械学报,2014,45(4):179-183. Wang Weihua, Wang Quanjiu. Scale-dependency of spatial variability of soil air permeability on typical oasis croplands at middle reaches of Heihe River [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4):179-183. (in Chinese)
- 13 史文娟,马媛,徐飞,等.不同微尺度膜下滴灌棉田土壤水盐空间变异特性[J].水科学进展,2014,25(4):585-593.
 Shi Wenjuan, Ma Yuan, Xu Fei, et al. Spatial variability of soil moisture and salt content in cotton field on microscales under mulch drip irrigation [J]. Advances in Water Science,2014,25(4):585-593. (in Chinese)
- 14 邢旭光,史文娟,王全九.不同覆膜开孔率条件棉花苗期土壤水盐分布特征及出苗率分析[J].西安理工大学学报,2014, 30(1):96-101,107.

Xing Xuguang, Shi Wenjuan, Wang Quanjiu. Analysis on laws of soil water and salt distribution characteristics and cotton emergence rate in seeding stage under different opening ratios [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2014, 30(1):96 – 101,107. (in Chinese)

- 15 潘颜霞,王新平,苏延桂,等. 荒漠人工固沙植被区浅层土壤水分动态的时间稳定性特征[J]. 中国沙漠,2009,29(1):81-86. Pan Yanxia, Wang Xinping, Su Yangui, et al. Temporal stability of surface soil moisture in artificially revegetated desert area [J]. Journal of Desert Research,2009,29(1):81-86. (in Chinese)
- 16 张继光,苏以荣,陈洪松,等.桂西北喀斯特区域土壤水分动态变化研究[J].水土保持通报,2007,27(5):32-36. Zhang Jiguang,Su Yirong,Chen Hongsong, et al. Dynamic change of soil moisture in Karst region of northwest Guangxi province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2007,27(5):32-36. (in Chinese)
- 17 郝振纯,吕美霞,吕美朝,等. 坡度作用下土壤水分时空异质性研究[J]. 水文,2012,32(2):5-10.
 Hao Zhenchun,Lü Meixia,Lü Meizhao, et al. Study on temporal and spatial heterogeneity of soil moisture under slope effect [J].
 Journal of China Hydrology,2012,32(2):5-10. (in Chinese)
- 18 李宝富,熊黑钢,张建兵,等. 干旱区农田灌溉前后土壤水盐时空变异性研究[J]. 中国生态农业学报,2011,19(3):491-499. Li Baofu,Xiong Heigang,Zhang Jianbing, et al. Spatial and temporal variations in soil water and salt in arid areas before and after irrigation [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2011,19(3):491-499. (in Chinese)
- 19 郭丽俊,李毅,李敏,等. 塿土土壤水力特性空间变异的多重分形分析[J]. 农业机械学报,2011,42(9):50-58.
 Guo Lijun, Li Yi, Li Min, et al. Multifractal study on spatial variability of soil hydraulic properties of Lou soil [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(9):50-58. (in Chinese)
- 20 王卫华,王全九.基于 GPS 和 GE 的土壤水力参数空间变异采样间距确定[J].农业机械学报,2014,45(3):97-100,106. Wang Weihua, Wang Quanjiu. Sample spacing of spatial variability of soil hydraulic parameters in basin scale based on GPS and Google Earth [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(3):97-100,106. (in Chinese)
- 21 Sun E, Nieto A, Li Z. GPS and Google Earth based 3D assisted driving system for trucks in surface mines [J]. Mining Science and Technology, 2010, 20(1):138-142.