

DOI: 10.20103/j.stxb.202403070469

孙贯芳, 朱焱, 杨金忠, 屈忠义, 李永红, 高照良. 干旱灌区土壤水分和盐分时间稳定性特征及其改进分组预测. 生态学报, 2024, 44(20): 9314-9328.

Sun G F, Zhu Y, Yang J Z, Qu Z Y, Li Y H, Gao Z L. Temporal stability characteristics of soil water and salt and the improved grouping prediction in arid irrigation areas. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(20): 9314-9328.

干旱灌区土壤水分和盐分时间稳定性特征及其改进分组预测

孙贯芳¹, 朱焱², 杨金忠², 屈忠义³, 李永红¹, 高照良^{1,*}

1 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100

2 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 武汉 430072

3 内蒙古科技大学能源与环境学院, 包头 014010

摘要: 干旱灌区土壤水分及盐分的时空变异性强, 时间稳定点的判断对区域水盐监测评估及预测具有重要意义。然而, 当前尚不清楚干旱灌区土壤水分和盐分时间稳定性特征及均值预测效果。为此, 以内蒙古河套灌区隆胜研究区大量的水盐观测数据为基础, 在分析区域土壤水盐时间稳定性特征及其差异的基础上, 提出改进分组时间稳定性分析方法, 并验证了其预测效果。结果表明, 土壤水分含量越小, 变异性越大, 而土壤盐分均值越大, 变异性越大。相应地, 土壤盐分平均相对偏差 (MRD) 和平均相对偏差的标准差 SDRD 的关系完全不同于土壤水分, 土壤盐分的 MRD 越小, SDRD 也越小, 并非 MRD 接近于 0 的点 SDRD 小。这导致用最小 SDRD、最小时间稳定性指数 ITS 或者多个 SDRD 较小的相对时间稳定性点估算区域土壤水分均值取得较好的结果 (R^2 均超过 0.96), 而估算区域土壤盐分则有较大偏差 (R^2 为 0.49—0.78)。将土壤水盐数据分成若干组, 在组内分别进行时间稳定性分析, 该改进时间稳定分析对区域土壤水分的预测效果并未提高, 但大幅提高土壤盐分预测效果, R^2 达到了 0.90 以上。以改进分组时间稳定性分析方法形成的土壤盐碱化长期监测点, 兼顾了不同盐渍化水平盐分的变化过程, 有利于了解不同盐渍化土壤在时间和空间上的演化过程。

关键词: 土壤水分; 土壤盐分; 河套灌区; 时间稳定性分析; 时空变异

Temporal stability characteristics of soil water and salt and the improved grouping prediction in arid irrigation areas

SUN Guanfang¹, ZHU Yan², YANG Jinzhong², QU Zhongyi³, LI Yonghong¹, GAO Zhaoliang^{1,*}

1 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

2 State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China

3 School of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China

Abstract: The spatial and temporal variability of soil water and salt in arid irrigation area is strong. A large number of observation data is often required to monitor, evaluate and predict regional water and salt dynamics. Thus, the selection of temporal stability location is of great significance to the long-term water and salt observations. However, the applicability of the temporal stability analysis methods to soil salinity in irrigated areas, and the similarities and differences of the temporal stability in soil water and salt, as well as the prediction effect of regional salt average with temporal stability analysis are still unclear. Therefore, based on a large number of water and salt observation data in Longsheng study area of Hetao Irrigation District in the Inner Mongolia, the temporal stability feature of regional soil salinity, and their similarities and differences

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFD2001404); 国家自然科学基金 (42307449, 52179041); 内蒙古自治区科技成果转化专项资金 (2021CG0022)

收稿日期: 2024-03-07; **网络出版日期:** 2024-07-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gzl@ms.iswc.ac.cn

compared with the temporal stability of soil water were analyzed. Then, an improved grouping temporal stability analysis method was proposed, and the prediction effect of this method on regional soil water and salt were verified. The results showed that the lower soil moisture content was with the greater variability, while the higher mean soil salinity was with the greater variability. This was because the heterogeneity of groundwater status and vegetation distribution in spatial location intensified the variation of soil moisture content when soil water decreased gradually. However, for soil salinity, soil salt leaching was mainly affected by soil texture and its own salt content when salt was washed out by sufficient irrigation or rainfall in the whole region. While the process of soil salt accumulation was affected by groundwater conditions, crop types, and so on. The spatial variability of influencing factors in the salt accumulation intensified the variation of soil salinity. Accordingly, the relationship between mean relative deviation (MRD) and standard deviation of the mean relative deviation (SDRD) of soil salt was completely different from that of soil water. The smaller MRD of soil salt was with the smaller SDRD, which was different from the soil water that the smaller SDRD was at the location where MRD was close to 0. The satisfactory results were obtained for estimating regional soil moisture (R^2 over 0.96) using the minimum SDRD, the minimum index of temporal stability (ITS) and multiple relative time stability points with small SDRD, while there was a large deviation (R^2 ranging from 0.49 to 0.78) for estimating regional soil salinity using same methods. This is attributed to the differences in relationship of MRD and SDRD between soil water and soil salinity. The soil water and salt data were divided into several groups, and the temporal stability analysis was carried out in each group. The improved grouping temporal stability analysis did not improve the prediction effect of regional soil water, but greatly improved the prediction effect of soil salt with the R^2 exceeding 0.90. For the long-term soil salinization monitoring locations formed by the improved grouping temporal stability analysis, the change process of soil salt at different salinization levels was considered, which is conducive to understanding the soil salinity evolution process of different salinized soils in time and space.

Key Words: soil water; soil salt; Hetao Irrigation District; temporal stability analysis; spatio-temporal variation

灌区是我国粮食安全的重要保障,占全国耕地面积约 49%的灌溉面积生产了约占全国总量 75%的粮食和 90%以上的经济作物^[1]。干旱灌区作为我国重要的粮棉基地,水资源短缺和土壤盐碱化已成为农业发展面临的主要障碍^[2]。在未来水资源配置调整和节约集约利用的新形势下,土壤盐碱化演变过程势必加快并愈发敏感^[3],将进一步加剧干旱灌区土壤盐碱化这一生态环境问题。通过高效的土壤水盐监测实现适时灌溉和合理水盐调控,是干旱区灌溉农业可持续发展的关键。

受降雨、灌溉、土壤质地、地下水状况、地形地貌、作物类型及人类活动等的影响,灌区土壤水分及盐分的时空变异性强,水盐动态监测评估及预测往往需要基于大量的定位观测数据。因此,在不丢失重要信息的前提下将观测次数与观测点最小化的方法具有重要的研究价值。Vachaud 等^[4]首先发现并提出了土壤水分时间稳定性概念,即土壤水分空间模式随着时间变化的相似性。自此,土壤水分及与土壤水分相关的土壤储水量、土壤有效水的时间稳定性在农田、草地等各种土地类型和样地-田块-小流域-北半球等不同研究尺度上得到了大量验证^[5-6],已被认为是土壤水分的重要特性^[7-8],并被广泛应用于尺度推绎、缺失土壤水分数据的插值、遥感土壤水分数据的校准和水分传感器埋设等领域^[9-12]。此外,也有少部分学者应用时间稳定性分析地下水及土壤盐分的时空变化规律。例如,徐国策等^[13]研究了洛惠渠灌区地下水电导率时间稳定性,提出了利用地下水电导率代表性位置点来监测研究区地下水平均电导率的变化以降低土壤盐渍化风险。Castrignanò 等^[14]用时间稳定性方法评价了 2.8 ha 田块的 EC_e、钠离子含量和钠吸附比的时间稳定性,发现使用很少一部分取样点就可以估算田间土壤平均盐碱化状况。Douaik 等^[15]基于时间稳定性理论,发现仅观测两个位置点的土壤盐分就可以获得一个 25 ha 田块的平均土壤盐分含量。邢旭光等^[16]研究了覆膜滴灌条件下农田微区棉花根层土壤盐分时间稳定性,发现在棉花主根层(0.40 m)内,选取代表微区对土壤含盐量进行估算精度较高。蒋志云等^[17]基于电磁感应成像发现了青海湖流域芨芨草斑块处土壤盐分含量总是高于基质区,表现出

时间稳定性。可见,土壤盐分时间稳定性也同样是普遍存在的,选取具有代表性的监测点对研究区土壤平均含盐量进行长期评估具有重要价值。然而,当前尚不清楚干旱灌区土壤盐分时间稳定性特征及均值预测效果。

本研究以内蒙古河套灌区隆胜研究区为对象,在评估各时间稳定性分析方法对区域土壤盐分适用性的基础上,根据盐分变异变化特点及与土壤水分时间稳定性特征的异同,提出改进分组时间稳定性分析方法,即将土壤水分或盐分数据分成若干组,在组内分别进行时间稳定性分析,并验证了该方法对区域土壤水分和盐分的预测效果。研究结果将为干旱灌区变异性较强的土壤盐分监测及预测提供理论和依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古河套灌区永济灌域内,西边为永济干渠,北为永刚分干沟,东至东济支渠,南临永刚分干渠,西南东北长约 15.5 km,西北东南宽约 8.0 km,总土地面积 8219.75 hm^2 ,现状灌溉面积 5560 hm^2 (图 1)。邻近的临河气象站年均降雨 148.8 mm(1981—2010 年),蒸发量(20 cm 蒸发皿)年均 2327 mm(1981—2010 年),作物生育期 5—9 月份降雨占全年降雨的 85%以上。2017 年降雨量为 100.5 mm,生育期降雨量 53.1 mm,2018 年降雨量 176.2 mm,生育期 156.6 mm^[18]。研究区地质构造为河湖相交替沉积形成的湖相和河相沉积层,0—2.50 m 垂直方向上土体构型较为复杂,多有粘土、细砂夹层,砂粘土和粉砂土互层的土体结构较为常见^[18]。

1.2 土壤水盐观测

在研究区内均匀布置了 68 个农田土壤水盐观测田块(图 1),分别于 2017 年 5 月初、2017 年 9 月末、2018 年 5 月初、2018 年 9 月末对研究区 0—1.80 m 深度范围内每 0.20 m 一层的土壤水盐进行了 4 次详细观测,分别标记为 Y1705、Y1709、Y1805 和 Y1809,共获取 4582 个有效土壤样本。考虑到区域水盐的强烈变异性,每次取样尽可能取到农田的中央位置,一个观测点取 2 个重复,秋季在膜内和膜外裸地分别取一个孔。春季部分观测点地下水埋深很浅,取到地下水水面处停止继续取样。土壤水分采用烘干法测定,土壤盐分用电导率仪(上海雷磁电导率仪 DDSJ-308F)测试水土比为 5:1 的土壤浸提液的电导率^[19]。隆胜研究区 0—1.80 m 土壤盐分均值空间分布见图 1。

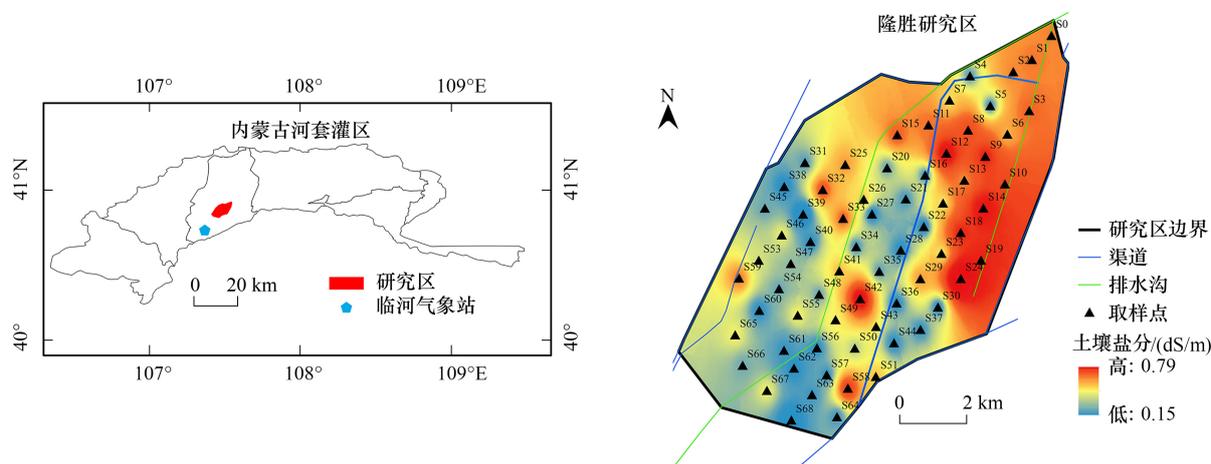


图 1 隆胜研究区水盐观测点位置图及土壤盐分空间分布图

Fig.1 Observation locations of water and salt sampling and spatial distribution map of soil salt in Longsheng study area

1.3 数据分析

1.3.1 时间稳定性分析

相对偏差方法被广泛用于时间稳定性研究,其表示具体样点时间上的稳定性^[6, 20],主要计算过程如下:

$$\delta_{i,j} = \frac{S_{i,j} - \bar{S}_j}{\bar{S}_j} \quad (1)$$

$$\bar{S}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{i,j} \quad (2)$$

$$\text{MRD}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \delta_{i,j} \quad (3)$$

$$\text{SDRD}_i = \sqrt{\sum_{j=1}^m \frac{(\delta_{i,j} - \text{MRD}_i)^2}{m-1}} \quad (4)$$

式中, $S_{i,j}$ 是在位置 i 处第 j 次的观测值; $\delta_{i,j}$ 为位置 i 处第 j 次观测值相对于第 j 次观测均值的相对偏差; MRD_i 为位置 i 处的平均相对偏差; SDRD_i 为位置 i 处的平均相对偏差的标准差; n 为观测位置数; m 为观测次数。

时间稳定点 (temporally stable location, TSL) 的选择是便于以较小的代价获取区域平均观测值, 常用的有 3 种方法, 分别是平均相对偏差法 (MRD)、平均相对偏差的标准差法 (SDRD) 和时间稳定性指数法 (ITS)。MRD 法认为 MRD 接近于零并且 SDRD 也比较小的样点是时间稳定点, 但是 MRD 接近于零的样点其 SDRD 并不一定小, 用这种方法选择时间稳定点具有一定的主观性^[21]; SDRD 法将最小 SDRD 的样点作为时间稳定点, 通过相对偏差平均值的转化得到研究区的平均值。ITS 法将 MRD 和 SDRD 两个指标按照式 (5) 联合起来作为一个新的指标, 有利于克服方法一和方法二的不足, 并得到了广泛应用^[20, 22-23]。

$$\text{ITS}_i = \sqrt{\text{MRD}_i^2 + \text{SDRD}_i^2} \quad (5)$$

式中, MRD 代表的是用时间稳定点直接估算区域水盐的准确度, MRD 越接近于 0, 表明该点的时间稳定性越好, 越接近于区域平均土壤水盐含量。SDRD 表示的是用各点土壤水分、盐分值估算区域均值的精度, SDRD 越小说明相对偏差法转换的区域土壤水盐均值精度越高。ITS 综合考虑了准确度和精度, 某一点的 ITS 越小, 表明用该点作为时间稳定性代表点, 能同时达到比较好的准确度和精度。本文将各观测期的相对偏差值视为一个常数^[24], 并统一用时间稳定点的相对偏差值 MRD_{TSL} 代替, 用时间稳定点的观测值通过转换得到区域均值 $S_{\text{REG},j}$,

$$S_{\text{REG},j} = \frac{S_{\text{TSL},j}}{1 + \text{MRD}_{\text{TSL}}} \quad (6)$$

1.3.2 相对时间稳定性分析

与其他点相比, 时间稳定点的 MDR 理论上对时间的变化是最不敏感的, 但由于受气候、取样时间及植被等的影响, Heathman 等^[25]认为这种线性补偿系数的计算方法不一定可以随着时间和空间转移。此外, 由于取样时间的局限性, 不同时期的时间稳定点也可能会有变化^[26]。因此, 用多个时间相对稳定点来估算区域均值将有效避免单个时间稳定点出现的不确定因素和弥补因为观测次数较少而出现的时间稳定点的误判。以多个相对时间稳定点来估计区域均值的方法^[27]如式 (7):

$$S_{\text{REG},j} = \frac{1}{s} \sum_{s=1}^s \frac{S_{s,j}}{1 + \text{MRD}_s} \quad (7)$$

式中, s 是时间稳定点的个数; $S_{s,j}$ 是相应的时间稳定点第 j 次的观测值; MRD_s 为相应时间稳定点的平均相对偏差。此种方法的难点是确定相对时间稳定点的个数, 可通过不同数量时间稳定点预测效果的比较, 确定合适的相对时间稳定点数量。

1.3.3 改进分组时间稳定性分析

改进分组时间稳定性分析是按各层土壤水分及土壤盐分 MRD 顺序将其分成 p 组, 对每组分别使用时间稳定性分析, 以 SDRD 最小的点为时间稳定点来实现各组水盐均值的预测。在进行组内土壤盐分时间稳定性分析之前, 需确定分组的数量 p , 通过自助抽样法确定分组数量 p 。自助抽样法由于不需要总体样本的任何假设, 对于小数据集及非正态分布的样本具有较好的适用性, 已被广泛应用于有关土壤性质取样策略的设

计^[27-30]。自助抽样是一种有放回的抽样方法,基本步骤为:(1)从可用的 n 个观测中随机选择 m 个样本(m 由 1 变化到 n),统计每次抽样的均值、标准误差、95%置信水平和标准差,重复 1000 次,对 1000 次重复产生的均值、标准误差、95%置信水平和标准差做平均,视为随机抽取 m 个样本得到的均值、标准误差、95%置信水平和标准差;将随机点数由 1 增加到 $n-1$,得到不同抽样点数的统计结果。自助抽样采用 R 软件的“sample”包。

采用 Excel 2019 软件对数据进行整理,利用 R 4.1.2 软件对水盐数据进行统计和时间稳定性计算,主要用 Origin 2021 软件作图。

2 结果与讨论

2.1 灌区土壤水盐统计特征分析

图 2 展示了不同观测期土壤水分均值,由图可知,9 月底 0—1.00 m 土壤水分明显小于 5 月初,在 2017 年降雨较少条件下这种差异更明显。0—1.00 m 土壤水分均值 Y1705 为 0.24 g/g, Y1709 较 Y1705 低 28.42%, 为 0.17 g/g; Y1805 为 0.23 g/g, Y1809 为 0.22 g/g,低了 7.63%。而 1.00—1.80 m 范围内,土壤水分均值较为

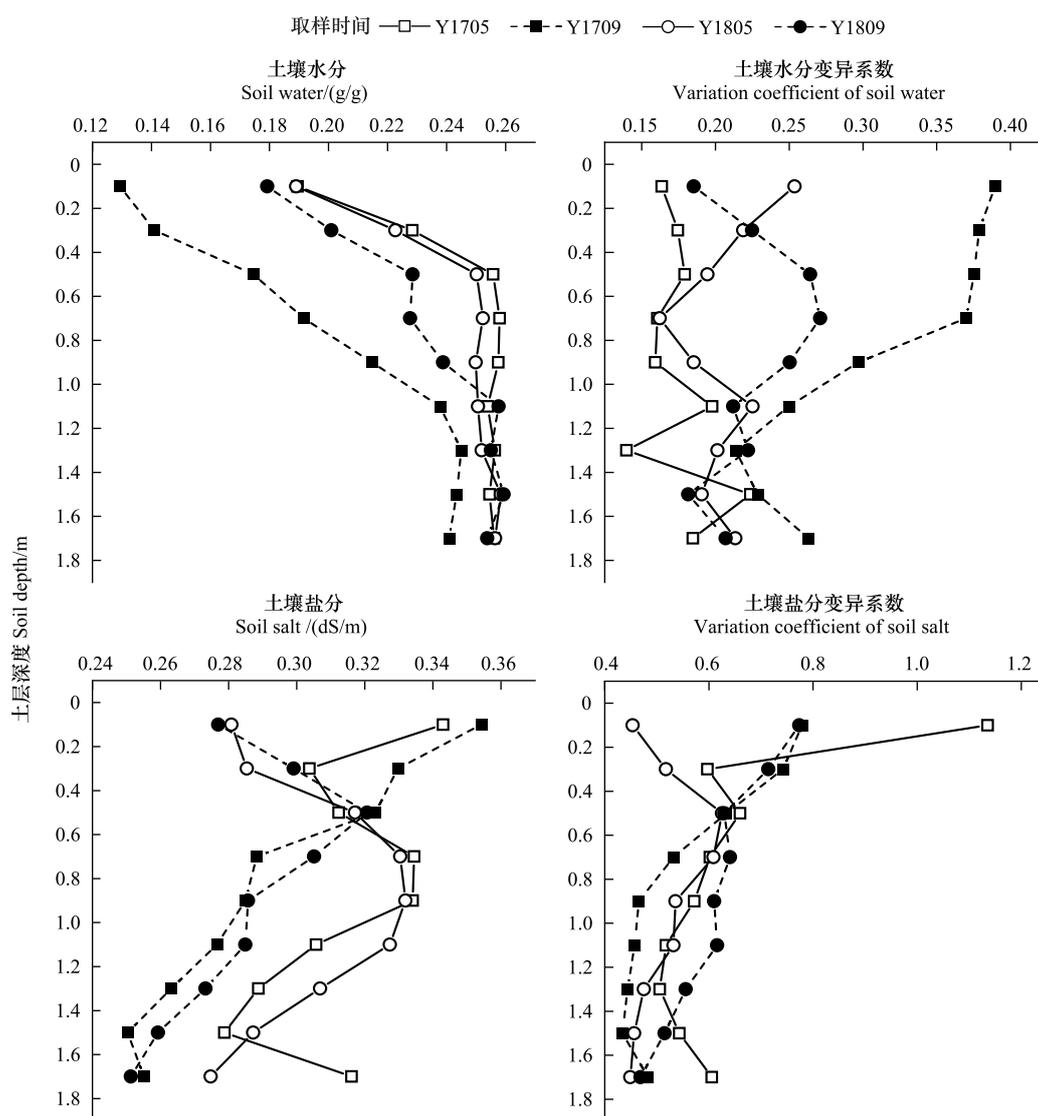


图 2 不同观测期土壤水分盐分均值及变异系数变化图

Fig.2 Changes of mean value and variation coefficient of soil water and salt in different observation periods

Y1705、Y1709、Y1805 和 Y1809 表示土壤水盐的取样时间,分别为 2017 年 5 月初、2017 年 9 月末、2018 年 5 月初、2018 年 9 月末

接近,2017年秋季1.00—1.80 m土壤水分均值较春季低5.28%,2018年仅高了0.83%,说明在该区域可不考虑1.00 m以下土壤水分的变化。不同观测期垂直方向上土壤水分变异系数如图2所示。土壤水分变异系数在0.16—0.39之间,属于中等弱变异。不同时期1.00 m以下土壤水分变异系数较为接近,而0—1.00 m土壤水分变异性不同时期有所差别,特别是Y1709土壤水分变异性明显大于其余观测期。经进一步分析,土壤水分变异系数与均值存在较好的指数关系, R^2 达到0.46,土壤水分含量越小,变异性越大,这与Gao等^[31]和Jacobs等^[22]对土壤水分均值和变异系数的关系研究结论相一致。

不同观测期各土层盐分均值如图2。0—0.40 m越接近表层,土壤盐分受降雨、灌溉、蒸发等上边界作用越强烈,盐分随时间波动越剧烈。4个观测期0—0.20 m土层盐分均值为0.314 dS/m,变化幅度达24.64%,0.20—0.40 cm盐分均值为0.304 dS/m,变化幅度达14.56%。0.40—0.60 m土壤盐分均值不同观测期变化范围为0.312—0.323 dS/m,变化幅度不超过5%,是盐分最为稳定的土层。0.60 m以下各层土壤盐分生育期初明显大于生育期末,且同一时期上部土层的盐分含量大于下部,说明在上年秋浇淋洗和冻融作用下,盐分多运移积聚于根系层底部土壤,未彻底淋滤至地下水。不同观测期不同土层土壤盐分变异系数如图2所示。土壤盐分变异系数在0.43—1.14之间,除Y1705表层0.20 m外,均属于中等强变异。盐分变异性远大于水分变异,这是因为决定一个土层盐分状况的是进出该土层盐分的差值,而该差值除了决定于该层土壤水分均衡外,还与土壤本身含盐量、上下层土壤盐分含量、地下水状况、作物类型等密切相关^[32—34],盐分的对流-弥散作用也不容忽视,盐分的运移机制较土壤水分更为复杂,也导致了其的高变异性。

整体来看,土壤盐分均值越大,变异性越大,这与对土壤水分均值和变异系数关系的研究结论不一致。土壤湿度状况直接影响土壤水分空间变异性,土壤水分变异系数与均值间呈指数递减关系,均值越大,变异系数越小^[22,28]。土壤水分盐分变异系数与空间均值关系的不一致性,是由土壤水分与盐分迁移累积机制的不一致性决定的。土壤水分含量较大时,其空间变异性取决于土壤质地,而土壤水分逐渐消耗减小时,空间位置上地下水状况、植被分布等的不均一性加剧土壤水分的变异。对土壤盐分而言,当整个区域盐分统一被充足的灌溉或降雨淋洗至较小值时,土壤盐分仅受土壤质地和本身盐分含量影响,盐分的空间均一性会增强。而土壤积盐过程除受本身土壤属性作用外,还受地下水状况、作物类型等的影响,各影响因素的空间变异性加剧了土壤盐分的变异^[34],导致盐分均值越大变异性越强。

2.2 时间稳定性方法对灌区土壤水盐适用性评价

由于2017年5月及2018年5月取样时春季地下水埋深较浅,1.20—1.80 m范围内土壤水盐数据有部分缺失,仅将0—1.20 m土壤盐分数据用于时间稳定性分析。0—1.20 m土壤水分和盐分的平均相对偏差MRD、平均相对偏差的标准差SDRD和时间稳定性指数ITS如图3所示。各层土壤水分MRD变化范围为0.68—0.39,SDRD变化范围是0.03—0.58,说明各观测点土壤水分与区域均值较为接近。以ITS值最小的点作为时间稳定点,则0—0.20 m、0.20—0.40 m、0.40—0.60 m、0.60—0.80 m、0.80—1.00 m、1.00—1.20 m的时间稳定点分别为S21、S33、S0、S64、S6和S65点,不同深度时间稳定点各不一样。土壤水分时间稳定性特征受土壤性质、地形因子、植被属性、气候因素等多种因素影响^[20, 35—36]。在这几个时间稳定性点中,S21、S33、S64、S6点土质偏粘,这符合Jacobs等^[22]和Grayson等^[24]在流域尺度上的研究结果:时间稳定点通常是坡度较低,坡面较平缓,粘粒含量较高的点。

同样的,如图4,以ITS值最小的点作为时间稳定点,则0—0.20 m、0.20—0.40 m、0.40—0.60 m、0.60—0.80 m、0.80—1.00 m、1.00—1.20 m土壤盐分的时间稳定点分别为S2、S2、S51、S59、S66和S46点。但需要注意的是,0—0.20 m、0.20—0.40 m、0.40—0.60 m、0.60—0.80 m、0.80—1.00 m、1.00—1.20 m土层土壤盐分MRD变化范围为-0.54—2.91、-0.53—1.90、-0.63—1.87、-0.63—1.61、-0.70—1.49、-0.63—1.86,极差均超过了2.0,表层土壤盐分的MRD极差甚至达到了3.45,这预示着土壤盐分的强烈变异性。各层土壤盐分的SDRD最大值均超过1.0,说明用有些点来预测区域土壤盐分均值是极不可信的,盐分均值的精度将大于区域盐分本身的均值。

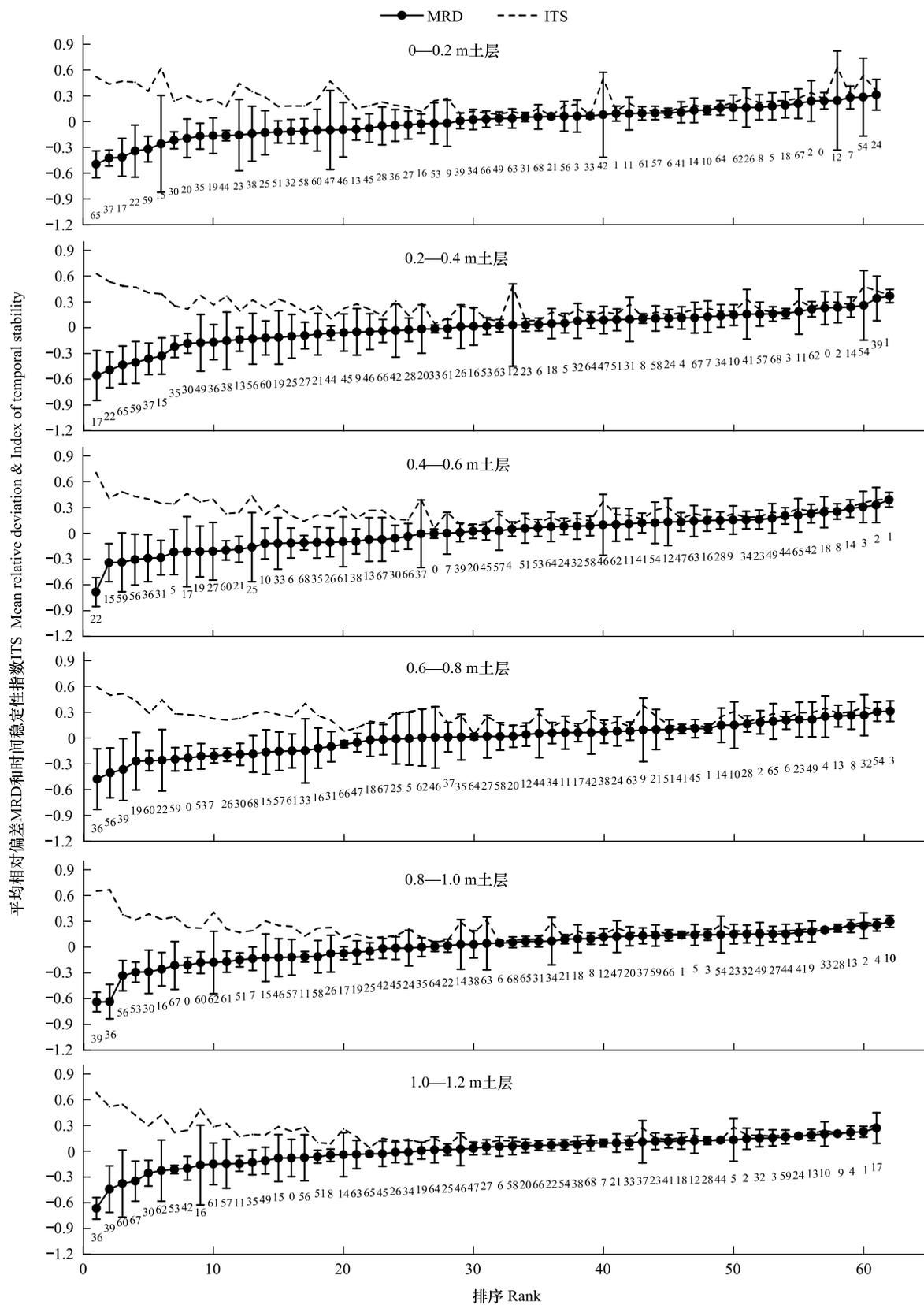


图3 不同深度土壤水分时间稳定性分析结果

Fig.3 Results of temporal stability analysis for soil water at different depths

图中误差棒表示平均相对偏差的标准差,数字表示取样点编号

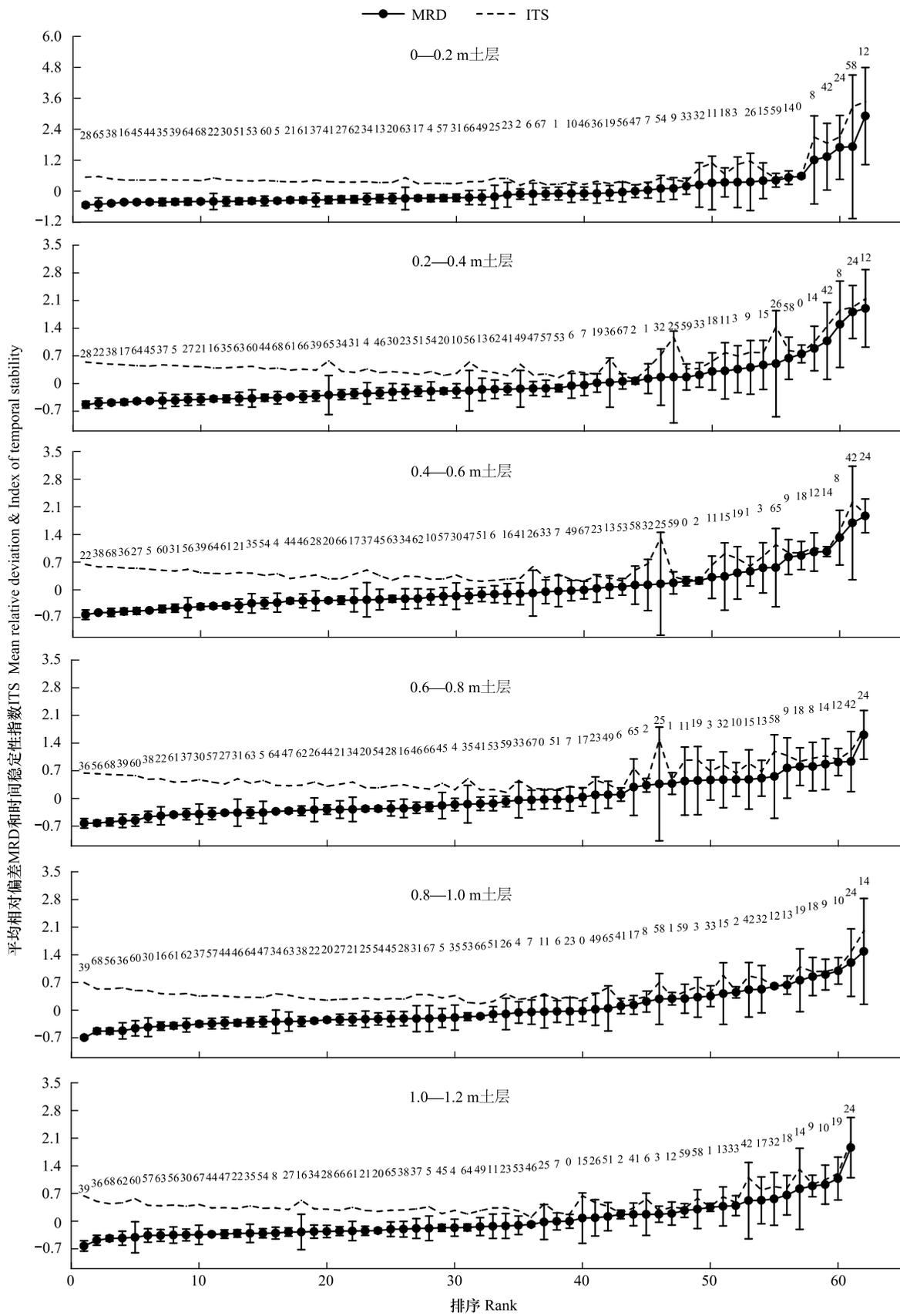


图 4 不同深度土壤盐分时间稳定性分析结果

Fig.4 Results of temporal stability analysis for soil salt at different depths

图中误差棒表示平均相对偏差的标准差,数字表示取样点编号

以时间稳定点平均相对偏差转换的区域土壤水分和盐分均值的预测值与实际观测值结果如图 5。各层土壤水分和盐分的预测效果较为相似,故各层不再分开单独评价时间稳定点的预测效果。以 RMSE 和 R^2 为指标,判断预测效果。土壤水分预测值与观测值的 RMSE 为 0.007 g/g, R^2 达到了 0.96,说明以 ITS 为判别时间稳定点的指标,仅以 1 个时间稳定点就可以预测区域土壤水分均值,所有关于土壤水分时间稳定性研究的报道均证实了这一点^[20,22,36-39]。同样的方法用于土壤盐分的预测, RMSE 为 0.04 dS/m, R^2 为 0.49,区域土壤盐分均值预测并未得到如土壤水分一样满意的效果。邢旭光等^[16]研究了一个 10 m×12.5 m 区域规模的土壤盐分稳定性,各土层盐分 MRD 的极差在 0.6—1.8 之间变化, SDRD 为 0.19—0.29,用时间稳定点盐分值预测区域均值,两者 R^2 达到 0.80 以上,可以达到满意的效果。同时作者也指出了该研究是基于微尺度的空间弱变异进行的,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。因此,对于中强变异性的区域土壤盐分而言,传统时间稳定性方法的适用性有待进一步验证或改进。

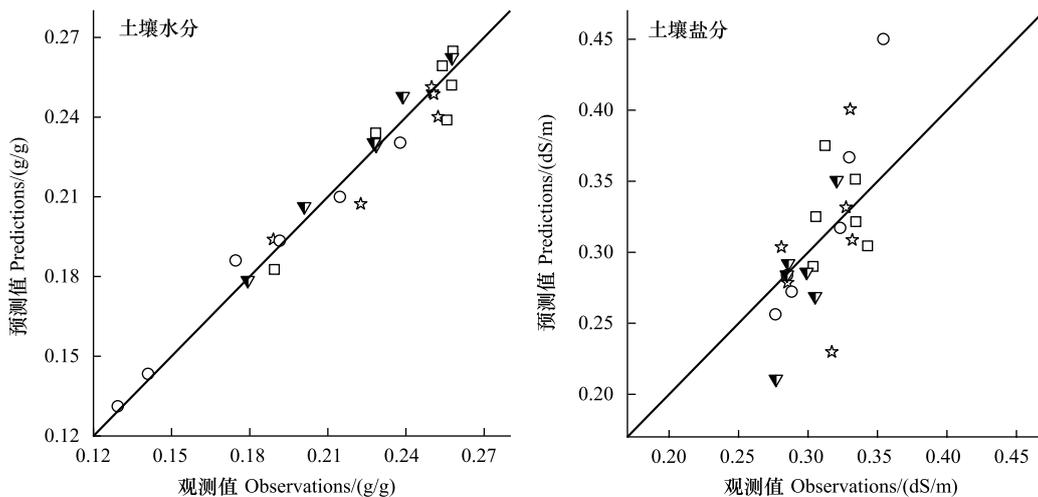


图 5 不同深度土壤水分和盐分时间稳定性预测结果

Fig.5 Prediction results of temporal stability analysis for soil water and soil salt at different depths

2.3 相对时间稳定性方法对灌区土壤水盐适用性评价

参考 Gao 等^[27],用多个相对时间稳定点来估算区域土壤水盐均值。为提高通过时间稳定点来预测区域水盐均值的精度,采用 SDRD 为时间稳定性评价指标, SDRD 越小,预测精度越高。0—1.20 m 土层每 0.2 m 一层的土壤水分时间稳定点自上而下依次分别是 S21、S33、S0、S64、S33 和 S9, 0—0.80 m 土层 SDRD 最小的点与 ITS 最小的点一致。0.80—1.00 m 和 1.00—1.20 m 土层土壤水分 ITS 最小的点是 S6 和 S65 点,是 SDRD 秩为 2 的点,以 SDRD 和以 ITS 为指标判定的土壤水分稳定点较为一致,这主要是土壤水分 MRD 越接近于 0, SDRD 也越小(见图 6),这是以 MRD 作为时间稳定性指标直接估算区域土壤水分的基础。0—0.20 m、0.20—0.40 m、0.40—0.60 m、0.60—0.80 m、0.80—1.00 m、1.00—1.20 m 土壤盐分 SDRD 最小的点分别为 S38、S45、S5、S64、S39 和 S44 点,与盐分 ITS 最小的点完全不一致。ITS 最小的点是 MRD 和 SDRD 均接近于 0 的点,而由图 6 可知,土壤盐分 MRD 和 SDRD 的关系完全不同于土壤水分,土壤盐分的 MRD 越小, SDRD 也越小,并非 MRD 接近于 0 的点 SDRD 小,这说明用 MRD 接近于 0 的点直接估算区域盐分均值会产生较大的误差,而用 ITS 作为指标的盐分时间稳定点并不能保证区域盐分估算取得较好的精度。综上所述,用 SDRD 或 ITS 作为时间稳定点判别指标估算区域土壤水分是没有问题的,而估算区域土壤盐分则会有较大的偏差。

分别用前 1、3、6、12、24、48 个相对时间稳定点通过式(7)预测区域水盐,结果见表 1。相比于以 ITS 为判别指标的区域平均土壤水分和盐分预测结果,以 SDRD 为指标,用 1 个相对时间稳定点预测的水盐结果均好于以 ITS 为指标的预测效果。水分的结果略有提升,而土壤盐分的 RMSE 由 0.04 dS/m 下降到 0.02 dS/m, R^2

由 0.49 提高到 0.55,说明以 SDRD 为指标可提高区域盐分预测的精度。由表 1 知,土壤水分不论相对时间稳定点数目为 1、3、6、12、24 个还是 48 个,均能取得较好的效果, R^2 在 0.966 到 0.993 间变化,相对时间稳定点数目的增加对土壤水分预测效果的提升并不明显。用 1 个相对时间稳点就可以取得较好的结果,考虑到其他因素的不确定性,建议用 3 个相对时间稳定点预测区域土壤水分均值。

表 1 不同数目相对时间稳定点的土壤水盐预测效果

Table 1 Soil water and salt prediction effect with different number of relative time stability locations

相对时间稳定点数目 Number of relative time stability locations	土壤水分 Soil water		土壤盐分 Soil salt	
	RMSE/(g/g)	R^2	RMSE/(dS/m)	R^2
1	0.0068	0.966	0.0221	0.545
3	0.0056	0.977	0.0139	0.674
6	0.0053	0.980	0.0109	0.776
12	0.0051	0.981	0.0109	0.776
24	0.0031	0.993	0.0126	0.696
48	0.0039	0.989	0.0153	0.552

RMSE 均方根误差 Root mean square error; R^2 决定系数 Determination coefficient

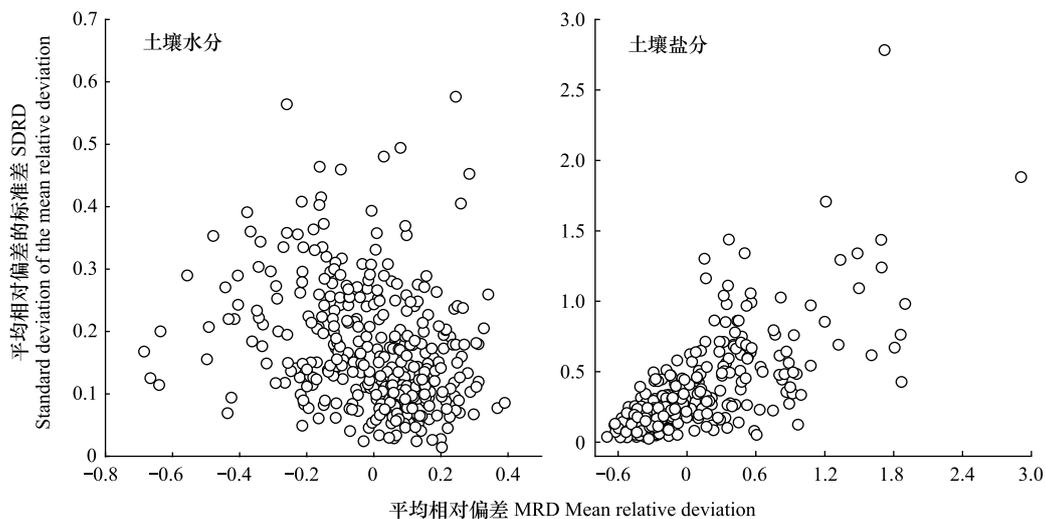


图 6 土壤水分和盐分平均相对偏差(MRD)和平均相对偏差的标准差(SDRD)关系图

Fig.6 Relationship between mean relative deviation (MRD) and standard deviation of the mean relative deviation (SDRD) for soil water and soil salt

随着相对时间稳定点数目由 1 增加到 6,土壤盐分预测结果的 RMSE 由 0.0221 dS/m 逐渐减小到 0.0109 dS/m, R^2 由 0.545 增加到 0.776,预测效果明显提升。而当相对时间稳定点数目由 6 增加到 12 时, RMSE 和 R^2 基本不变化。自 12 之后,随着相对时间稳点数目的增加,土壤盐分的预测效果逐渐变差,时间稳点数目逐渐达到 24 后,预测效果明显下降。由此可见,土壤盐分相对时间稳定点的数目并不是越多越好。相对时间稳定点的排序越靠后,平均相对偏差 MRD 的 SDRD 越大,预测的精度随之降低,进而影响区域盐分均值的估算。因此,确定土壤盐分相对时间稳定点的数目,以获取较准确的预测结果是必要的。进一步加密 1—24 间的时间稳定点数目,探索土壤盐分预测效果与相对时间稳定点数目间的关系,可以发现 RMSE 与相对时间稳定点数目间呈 3 次多项式关系(图 7),当相对时间稳定点数目由 1 增加到 6, RMSE 快速下降,由 6 增加到 12, RMSE 基本不变,由 12 到 24, RMSE 略有上升,总体来看当相对时间稳定点达到 6—24 个后 RMSE 均稳定在 0.011 至 0.013 dS/m 间。当相对时间稳定点数目由 1 增加到 6, R^2 由 0.545 快速增加到 0.776,之后也基本不变化。因此,建议用 6 个相对时间稳定点预测区域土壤盐分。各层用于土壤水分相对时间稳定性分析的前 3

个和土壤盐分的前 6 个点,如表 2 所示。除去各层间的重复样点,土壤水分需监测 15 个样点,土壤盐分需监测 22 个样点。相对时间稳定性分析是以较小的代价获取区域水盐均值的高效方法,是完成水盐由点到面尺度提升的有效手段。

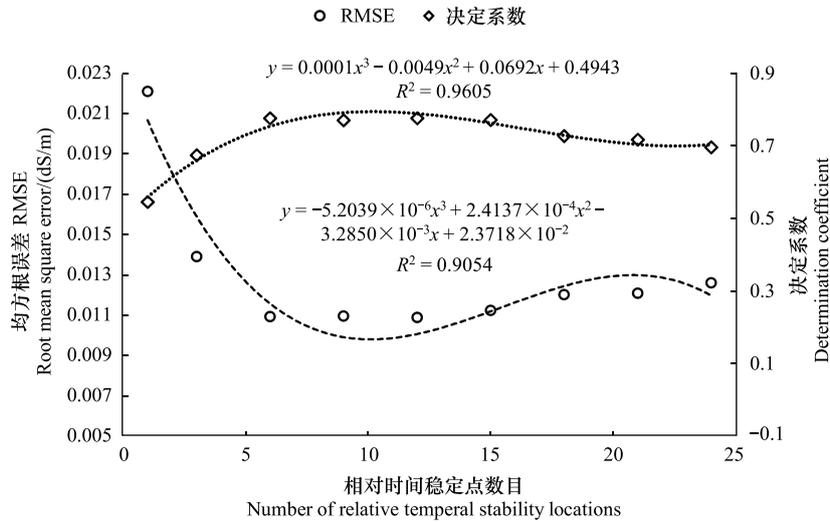


图 7 土壤盐分预测效果与相对时间稳定点数目的关系

Fig.7 Relationship between soil salt prediction effect and number of relative temporal stability locations

表 2 相对时间稳定性分析的区域土壤水盐监测点

Table 2 Regional soil water and salt monitoring locations recommended by relative temporal stability analysis

土壤水盐 Soil water or salt	0—0.20 m	0.20—0.40 m	0.40—0.60 m	0.60—0.80 m	0.80—1.00 m	1.00—1.20 m
土壤水分 Soil water	S21	S33	S0	S64	S33	S9
土壤水分 Soil water	S33	S8	S20	S66	S6	S65
	S10	S3	S4	S1	S1	S44
土壤盐分 Soil salt	S38	S45	S5	S64	S39	S44
土壤盐分 Soil salt	S16	S61	S38	S27	S66	S46
	S45	S64	S20	S61	S12	S20
	S68	S38	S64	S20	S20	S68
	S28	S16	S44	S47	S22	S64
	S0	S17	S61	S54	S37	S45

2.4 改进分组时间稳定性分析对灌区水盐的预测效果

相对时间稳定性对区域土壤盐分的预测结果有一定提升,但与土壤水分预测效果仍有一定差距。在统计学中,在样本数量一定的情况下去估算均值,其的相对误差取决于变异系数的平方^[30],即变异系数越大,用一定样本数估算的均值越不准确。土壤盐分较大的变异性可能是预测结果较为不理想的主要原因。为此,将土壤盐分根据 MRD 的排序结果,分成若干个组,每组的变异性会有较大的降低,在组内分别用时间稳定性分析预测组内盐分均值,以保证预测精度,同时有利于获取区域不同盐碱化程度土壤盐分的变化情况。

不同时期土壤水分和盐分抽样得到的均值、标准误差、95%置信水平和标准差随抽样点数的变化规律是一致的,图 8 仅以 Y1709 为例展示了土壤水分和盐分的抽样结果。土壤水分均值基本在抽样点数目达到 3 个后就基本不变化;均值的标准误差和 0.95 置信水平先随抽样数目的增加急剧减小,在抽样数目达到 10 后平稳变化;土壤水分的标准差在抽样数目达到 5 后,基本平稳,之后的小波动是由于 1000 次重复未能覆盖全部抽样组合所致^[30]。由此可见,在区域内随机选取 3—5 个土壤样点就能较好的得到土壤水分均值。同样,土壤盐分选取 5—10 个就可以较准确的预测区域土壤盐分均值和标准差。

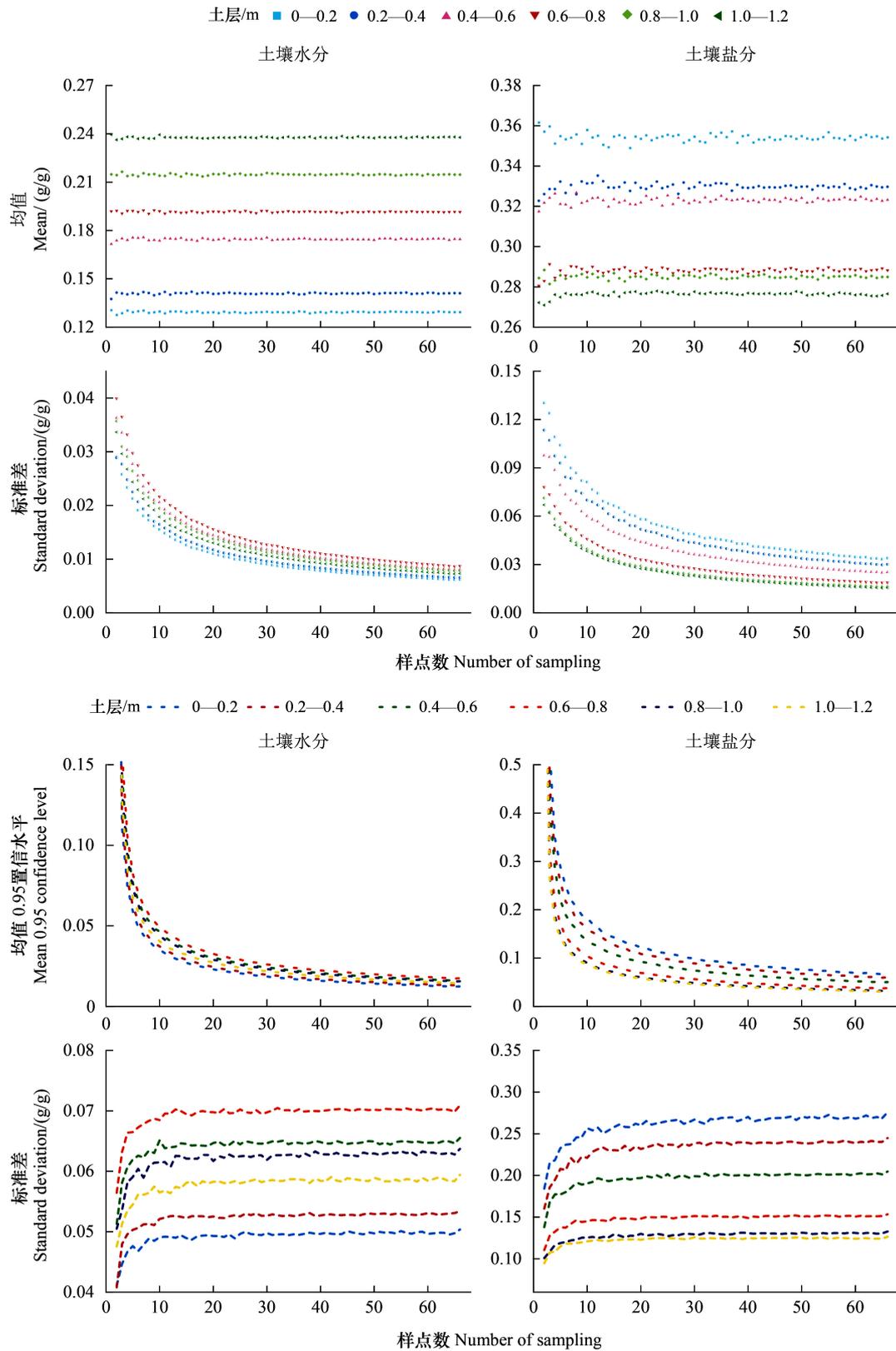


图8 土壤水分及盐分均值、标准误差、0.95置信水平及标准差随抽样点目数的变化

Fig.8 Changes of the mean value, standard error, confidence level of 0.95 and standard deviation of soil water and salt with the number of sampling

0—1.20 m 土层 4 个时期全部有效的样本容量为 62,结合抽样结果,按各层土壤水分及土壤盐分 MRD 顺序将其分成 7 组,前 6 组每组 9 个样点,第 7 组 8 个样点。该改进分组时间稳定性分析方法预测的土壤水分和盐分结果分别见图 9 和表 3。由表 3 预测效果评价指标可知,与一般意义上的时间稳定性分析和相对时间稳定性分析的结果相比,改进分组时间稳定性分析对土壤水分的预测效果并未提高。而对于土壤盐分而言,预测效果较前两种方法大幅提高,各层 RMSE 在 0.03—0.07 dS/m 范围内变化, R^2 均达到了 0.90 以上,说明此方法对于中强变异的土壤盐分而言,有非常好的预测效果。由图 9 也可知,改进时间稳定性方法对低盐分含量的预测效果好于高盐分含量预测效果,这是由于盐分含量越高,相对偏差 MRD 的标准差 SDRD 越大(见图 6),预测精度越低。总之,以改进分组时间稳定性分析方法形成的土壤盐碱化长期监测点(见表 4),兼顾了不同盐渍化水平盐分的变化过程,有利于了解不同盐渍化土壤在时间和空间上的演化过程。

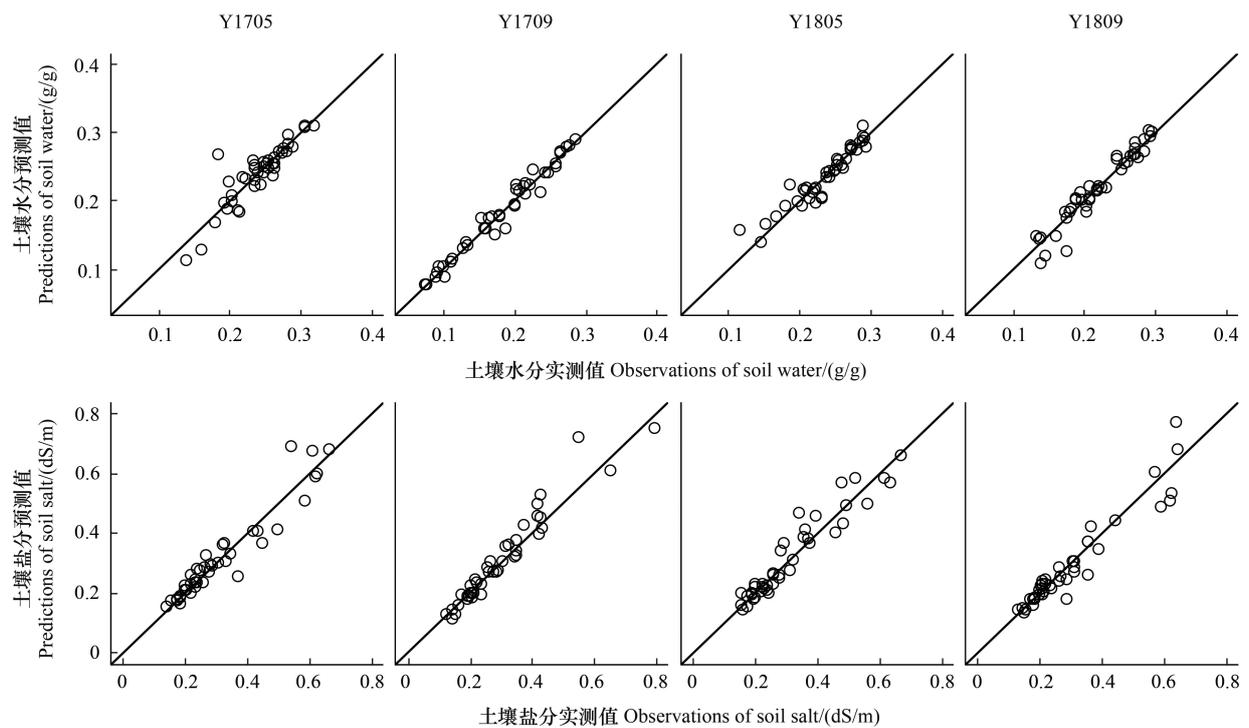


图 9 土壤水分及盐分改进分组时间稳定性分析预测效果图

Fig.9 Prediction effect of soil water and soil salt with improved grouping temporal stability analysis

表 3 不同深度土壤水分、盐分改进时间稳定性预测效果

Table 3 prediction effect of soil water and soil salt using improved grouping temporal stability at different depths

土层深度/m Soil depths	土壤水分 Soil water		土壤盐分 Soil salt	
	RMSE/(g/g)	R^2	RMSE/(dS/m)	R^2
0—0.20	0.01	0.89	0.07	0.90
0.20—0.40	0.01	0.95	0.05	0.91
0.40—0.60	0.01	0.94	0.03	0.97
0.60—0.80	0.01	0.93	0.05	0.92
0.80—1.00	0.01	0.95	0.05	0.90
1.00—1.20	0.02	0.79	0.03	0.93
所有 All	0.01	0.93	0.05	0.92

表 4 改进分组时间稳定性分析确定的区域土壤盐分监测点

Table 4 Regional soil salinity monitoring locations determined by improved grouping temporal stability analysis

MRD 顺序 Rank of MRD	0—0.20 m	0.20—0.40 m	0.40—0.60 m	0.60—0.80 m	0.80—1.00 m	1.00—1.20 m
1—9	S28	S64	S5	S61	S39	S63
2—18	S51	S61	S61	S47	S46	S44
19—27	S27	S51	S63	S54	S54	S20
28—36	S66	S20	S51	S66	S51	S64
37—45	S1	S2	S49	S2	S6	S2
46—54	S18	S33	S2	S10	S2	S1
54—62	S59	S0	S14	S18	S12	S9

3 结论

区域水分盐分监测点的确定是土壤水盐长期监测的基础。而区域土壤水分特别是盐分变异变化影响因素多而复杂,时空异质性强,为监测点的选择带来了困难。本文评价了各时间稳定性方法对于干旱灌区土壤水分、盐分的适用性及时间稳定性特征,基于此改进了时间稳定性分析方法,并验证了其对于区域土壤水分和盐分的预测效果。取得的主要结论有:

(1) 不同于土壤水分均值与变异系数间的关系,干旱灌区土壤盐分均值越大,变异性越大。当整个区域盐分被充足的灌溉或降雨淋洗至较小值时,土壤盐分仅受土壤质地和本身盐分含量的影响,而土壤积盐过程还受地下水状况、作物类型等的影响,各影响因素的空间变异性加剧了土壤盐分的变异。

(2) 土壤盐分 MRD 和 SDRD 的关系完全不同于土壤水分,土壤盐分的 MRD 越小,SDRD 也越小,并非 MRD 接近于 0 的点 SDRD 小。这是用最小 SDRD、ITS 或者多个 SDRD 较小的相对时间稳定性点估算区域土壤水分均取得较好的结果,而估算区域土壤盐分则有较大偏差的根本原因。

(3) 相对时间稳定性分析方法虽对土壤盐分均值的预测有一定的提升,但仍未达到如土壤水分一样令人满意的效果。建议用 3 个 SDRD 较小的相对时间稳定点估算区域土壤水分均值,6 个相对时间稳定点估算区域土壤盐分均值。

(4) 改进时间稳定分析对区域土壤水分的预测效果并未提高,而土壤盐分预测效果大幅提高, R^2 达到了 0.90 以上。以改进分组时间稳定性分析方法形成的土壤盐碱化长期监测点,兼顾了不同盐渍化水平盐分的变化过程,有利于了解不同盐渍化土壤在时间和空间上的演化过程。

参考文献 (References):

- [1] 康绍忠. 加快推进灌区现代化改造 补齐国家粮食安全短板. 中国水利, 2020(9): 1-5.
- [2] 史海滨, 杨树青, 李瑞平, 李仙岳, 李为萍, 闫建文, 苗庆丰, 李祯. 内蒙古河套灌区节水灌溉与水肥高效利用研究展望. 灌溉排水学报, 2020, 39(11): 1-12.
- [3] 杨劲松, 姚荣江, 王相平, 谢文萍, 张新, 朱伟, 张璐, 孙瑞娟. 中国盐渍土研究: 历程、现状与展望. 土壤学报, 2022, 59(1): 10-27.
- [4] Vachaud G, Passerat De Silans A, Balabanis P, Vauclin M. Temporal stability of spatially measured soil water probability density function. Soil Science Society of America Journal, 1985, 49(4): 822-828.
- [5] 丁聪, 王冬梅, 贺康宁, 李平, 张鹏, 梁士楚. 黄土高寒区坡面土壤水分的时间稳定性. 生态学报, 2020, 40(1): 151-160.
- [6] 陈维梁, 王树学, 齐统祥, 焦磊, 王聪, 买尔当·克依木, 李宗善, 傅伯杰. 黄土丘陵区不同恢复年限人工刺槐林土壤水分时空动态及其时间稳定性. 生态学报, 2021, 41(14): 5643-5657.
- [7] 赵文举, 李晓萍, 范严伟, 郁文, 唐学芬. 西北旱区压砂地土壤水分的时空分布特征. 农业工程学报, 2015, 31(17): 144-151.
- [8] Zhou X L, Hu K M, Xiao H L, Yang Y T, Chen J Y, Cheng Y Z. Effects of vegetation on the spatiotemporal distribution of soil water content in re-vegetated slopes using temporal stability analysis. Catena, 2024, 234: 107570.
- [9] Jiang Y J, Zhang Y L, Fan B H, Wen J H, Liu H, Mello C R, Cui J F, Yuan C, Guo L. Preferential flow influences the temporal stability of soil moisture in a headwater catchment. Geoderma, 2023, 437: 116590.
- [10] 沈晗悦, 信忠保, 王志杰. 北京山区侧柏林坡面土壤水分时空动态及其影响因素. 生态学报, 2021, 41(7): 2676-2686.
- [11] 蔺鹏飞, 朱喜, 何志斌, 杜军, 陈龙飞. 土壤水分时间稳定性研究进展. 生态学报, 2018, 38(10): 3403-3413.

- [12] 李秀梅, 赵伟霞, 李久生, 栗岩峰. 水分亏缺程度对变量灌溉水分传感器埋设位置预判的影响. 农业工程学报, 2018, 34(23): 94-100.
- [13] 徐国策, 刘海波, 申震洲, 王金花, 冉大川, 李占斌, 李鹏. 洛惠渠灌区地下水电导率时间稳定性分析. 农业工程学报, 2015, 31(10): 115-121.
- [14] Castrignanò A, Lopez G, Stelluti M. Temporal and spatial variability of electrical conductivity, Na content and sodium adsorption ratio of soil saturation extract measurements. *European Journal of Agronomy*, 1994, 3(3): 221-226.
- [15] Douaik A, Van Meirvenne M, Tóth T. Temporal stability of spatial patterns of soil salinity determined from laboratory and field electrolytic conductivity. *Arid Land Research and Management*, 2006, 20(1): 1-13.
- [16] 邢旭光, 赵文刚, 马孝义, 赵伟, 史文娟. 覆膜滴灌条件下棉花根层土壤盐分时间稳定性研究. 农业机械学报, 2015, 46(7): 146-153.
- [17] 蒋志云, 李小雁, 张思毅, 吴华武, 马育军, 胡中民. 基于电磁感应成像植被斑块土壤水盐效应研究. 生态学报, 2019, 39(24): 9188-9199.
- [18] 孙贯芳, 高照良, 朱焱, 杨金忠, 屈忠义. 时空克里金评估河套灌区土壤盐分时空格局. 干旱区研究, 2023, 40(2): 182-193.
- [19] 孙贯芳, 屈忠义, 杜斌, 任中生, 刘安琪. 不同灌溉制度下河套灌区玉米膜下滴灌水热盐运移规律. 农业工程学报, 2017, 33(12): 144-152.
- [20] Penna D, Brocca L, Borga M, Dalla Fontana G. Soil moisture temporal stability at different depths on two alpine hillslopes during wet and dry periods. *Journal of Hydrology*, 2013, 477: 55-71.
- [21] Hu W, Shao M A, Reichardt K. Using a new criterion to identify sites for mean soil water storage evaluation. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74: 762-773.
- [22] Jacobs J M, Hsu E, Choi M. Time stability and variability of Electronically Scanned Thinned Array Radiometer soil moisture during Southern Great Plains hydrology experiments. *Hydrological Processes*, 2010, 24(19): 2807-2819.
- [23] Zhao Y, Peth S, Wang X Y, Lin H, Horn R. Controls of surface soil moisture spatial patterns and their temporal stability in a semi-arid steppe. *Hydrological Processes*, 2010, 24(18): 2507-2519.
- [24] Grayson R B, Western A W. Towards areal estimation of soil water content from point measurements: time and space stability of mean response. *Journal of Hydrology*, 1998, 207(1/2): 68-82.
- [25] Heathman G C, Cosh M H, Han E, Jackson T J, Mckee L, Mcafee S. Field scale spatiotemporal analysis of surface soil moisture for evaluating point-scale in situ networks. *Geoderma*, 2012, 170: 195-205.
- [26] Han E, Heathman G C, Merwade V, Cosh M H. Application of observation operators for field scale soil moisture averages and variances in agricultural landscapes. *Journal of Hydrology*, 2012, 444/445: 34-50.
- [27] Gao X D, Wu P T, Zhao X N, Wang J W, Shi Y G, Zhang B Q, Tian L, Li H B. Estimation of spatial soil moisture averages in a large gully of the Loess Plateau of China through statistical and modeling solutions. *Journal of Hydrology*, 2013, 486: 466-478.
- [28] Brocca L, Melone F, Moramarco T, Morbidelli R. Spatial-temporal variability of soil moisture and its estimation across scales. *Water Resources Research*, 2010, 46(2): p.W02516.1.
- [29] Dane J H, Reed R B, Hopmans J W. Estimating soil parameters and sample size by bootstrapping. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(2): 283-287.
- [30] Wang C M, Zuo Q, Zhang R D. Estimating the necessary sampling size of surface soil moisture at different scales using a random combination method. *Journal of Hydrology*, 2008, 352(3/4): 309-321.
- [31] Gao X D, Wu P T, Zhao X N, Zhang B Q, Wang J W, Shi Y G. Estimating the spatial means and variability of root-zone soil moisture in gullies using measurements from nearby uplands[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 476: 28-41.
- [32] Sun G F, Zhu Y, Ye M, Yang J Z, Qu Z Y, Mao W, Wu J W. Development and application of long-term root zone salt balance model for predicting soil salinity in arid shallow water table area. *Agricultural Water Management*, 2019, 213: 486-498.
- [33] Sun G F, Zhu Y, Mao W, Li Y H, Yang J Z, Gao Z L. Development and application of a monthly water and salt balance model for seasonally frozen agricultural and non-agricultural areas with shallow groundwater table. *Catena*, 2024, 235: 107701.
- [34] Sun G F, Zhu Y, Gao Z L, Yang J Z, Qu Z Y, Mao W, Wu J W. Spatiotemporal patterns and key driving factors of soil salinity in dry and wet years in an arid agricultural area with shallow groundwater table. *Agriculture* 2022, 12: 1243.
- [35] Lin H. Temporal stability of soil moisture spatial pattern and subsurface preferential flow pathways in the shale hills catchment. *Vadose Zone Journal*, 2006, 5: 317-340.
- [36] Hu W, Shao M A, Han F P, Reichardt K. Spatio-temporal variability behavior of land surface soil water content in shrub- and grass-land. *Geoderma*, 2011, 162: 260-272.
- [37] Brocca L, Tullio T, Melone F, Moramarco T, Morbidelli R. Catchment scale soil moisture spatial-temporal variability. *Journal of Hydrology*, 2012, 422/423: 63-75.
- [38] Liu B X, Shao M A. Estimation of soil water storage using temporal stability in four land uses over 10 years on the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 2014, 517: 974-984.
- [39] Shen Q, Gao G Y, Hu W, Fu B J. Spatial-temporal variability of soil water content in a cropland-shelterbelt-desert site in an arid inland river basin of Northwest China. *Journal of Hydrology*, 2016, 540: 873-885.