

山东省土壤相对湿度时空分布特征研究

石兆鹏^{1,2}, 杨迪文², 崔兆韵¹, 李瑞洁³, 杨丽娟^{2*}

(1. 山东省泰安市气象局, 山东 泰安 271000; 2. 沈阳农业大学土地与环境学院, 辽宁 沈阳 110866;
3. 泰安市林业保护发展中心, 山东 泰安 271000)

摘要:【目的】明晰山东省耕地 0~50 cm 土壤相对湿度(相对于田间持水量)时空变化特点及其与气象要素的关系, 为农业生产发展提供支持。【方法】使用山东省气象部门布设的 139 个土壤水分自动观测站观测的 2013~2019 年逐日土壤相对湿度数据和气象观测数据, 用反距离权重空间插值法插值绘图探讨不同时段不同深度土层相对湿度的空间变化, 并对其与气象要素的关系进行相关性分析。【结果】山东省各时段耕地土壤相对湿度分布整体呈现由西向东逐渐减小的趋势, 垂直分布呈现随土层加深而增加的趋势; 一年内 0~30 cm 土层土壤相对湿度 1 月~8 月逐步升高, 8 月~翌年 1 月逐步降低, 而 30~50 cm 土层土壤相对湿度变化较小。各土层年均土壤相对湿度表现出逐年下降的趋势。夏、秋两季各土层月平均相对湿度与当月降水量之间显著正相关。【结论】山东省月平均耕地土壤相对湿度水平、垂直方向变化明显, 主要发生在 0~30 cm 土层; 年平均土壤相对湿度 2013~2019 年间呈现出逐年下降的趋势, 土壤相对湿度主要受降水量影响。

关键词: 土壤水分; 时空分布; 山东省; 气象要素

中图分类号: S16 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2024)01-0020-09

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2023052602

石兆鹏, 杨迪文, 崔兆韵, 李瑞洁, 杨丽娟. 山东省土壤相对湿度时空分布特征研究[J]. 土壤通报, 2024, 55(1): 20-28

SHI Zhao-peng, YANG Di-wen, CUI Zhao-yun, LI Rui-jie, YANG Li-juan. Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Soil Relative Humidity in Shandong Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2024, 55(1): 20-28

【研究意义】土壤水分是土壤的重要组成部分, 是陆地生态系统中的一个关键状态变量, 是陆地水量平衡和水循环重要的组成部分^[1], 也是监控土地退化和干旱的重要指标, 是农业和自然生态系统中影响植物生产力的重要指标^[2], 是评估农业生长状况的关键变量^[3-4], 了解土壤水分的时间变化和空间变换对于研究水文过程、农业用水管理和开发土壤水分预测模型等均至关重要^[5]。

【前人研究进展】根据《中国气象灾害年鉴(2018)》, 中国 2017 年干旱所导致的农作物受灾面积占当年气象灾害所致受灾面积 53.4%, 由此导致的直接经济损失占全年灾害经济损失的 13.2%^[6]。李莹等^[7]研究表明, 2001~2020 年, 洪涝灾害造成的全国年均农作物受灾面积 8.577×10^6 hm², 农作物受灾面积占当年主要农作物播种面积的比例多年均值为 0.5%。土壤水分会受到气候条件、土层深度、地区地域和季节变化等因素的影响, 从而使其表现出

较为显著的时空变异性^[8-9]。Perry 等^[10]研究表明澳大利亚维多利亚州南部某流域土壤含水量具有显著的季节变化性。然而, 冉有华等^[11]研究发现黑河流域不同深度土层中土壤水分的时间稳定性表现不一。Hu 等^[12]研究也表明黄土高原地区土壤水分具有时间稳定性。Gómez-Plaza 等^[13]指出地形是影响半干旱地区土壤水分时间稳定性的关键因素。以前, 对土壤水分的观测以人工观测为主, 费时费力, 且观测时间间隔较长。2005 年以来, 中国气象局开展了土壤水分自动观测网的建设^[14], 形成并推广了土壤水分自动观测的行业标准, 土壤水分自动观测数据具有了快速、方便、连续的优势, 也具有了更高的科研价值, 为干旱监测、农业气象预报与服务提供了高时空分辨率的观测资料。赵梦凡等^[15]对海北牧试站的自动土壤水分观测站与人工观测的土壤质量含水量率进行了研究, 结果表明, 二者之间绝对误差均小于 3%, 自动观测的土壤水分资料基本能代替人工观测。

收稿日期: 2023-05-26; 修订日期: 2023-08-02

基金项目: 山东省气象局科学技术研究面上项目(2017sdqxm15)资助

作者简介: 石兆鹏(1996-), 男, 山东泰安人, 硕士, 助理工程师, 主要从事土壤与植物营养学、农业气象学研究。E-mail: shizhaopeng@ta.shandong.cn

*通讯作者: E-mail: syau_ylj@163.com

【本研究切入点】以往研究对黄土高原等地的土壤水分时空分布关注较多,且多为短期试验^[16-22]。利用长期定位观测数据对山东省土壤水分时空分布特征的研究则鲜见报道。本研究应用中国气象局2005年以来布设的自动土壤水分观测站观测的数据开展研究,与传统的人工取土观测和短期试验相比,长期定位观测数据更具有准确性、客观性、系统性和连续性,可有效排除短期试验可能存在的季节性、年份差异、人为因素等干扰,能够更准确地反映研究区域内土壤水分的真实含量和分布特征。

【拟解决的问题】本研究以山东省作为研究区,对山东省土壤水分的变化特点进行研究,利用山东省气象部门布设的土壤水分站自动观测数据,分析山东省土壤水分的空间分布格局和时间分布特征,揭示山东省土壤相对湿度(相对于田间持水量)时空变异特征;最终引入气象要素,探究部分地区土壤水分变化与气象要素的关系,为揭示山东省水文特征、指导农业生产提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

山东省位于中国东部沿海,东西长达 721.03 km,南北长达 437.28 km。山东省包括半岛和内陆两部分,山东半岛位于渤海、黄海之中,同辽东半岛隔海相望;内陆部分与冀、豫、皖、苏四省接壤。全省土地面积 $15.80 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[23],其中耕地面积 $6.4 \times 10^4 \text{ km}^2$;海洋面积 $15.96 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。全省地势中部高四周低,中部地区山地较多,西南与西北地区地势平坦,东部以丘陵为主。泰山位于山东省中部,主峰海拔 1532.7 m,为全省最高点。黄河三角洲海拔约 2~10 m,为山东省陆地最低点。目前,山东省辖 16 个设区的市,136 个县级行政区。山东省属暖温带季风气候,四季分明,寒暑适宜,光温同步,雨热同季,春季干燥多风,夏季炎热多雨,秋季晴和清爽,冬季寒冷少雪^[24]。全年平均气温为 13.8 ℃,基本呈由西南向东北递减的分布规律;年平均降水量 665.9 mm,分布特点是南多北少,泰山为全省降水量最多的地方;年平均日照时数 2323.5 h,一般从南往北增多。主要气象灾害有暴雨、干旱、大风、冰雹、霜冻等。山东省内降水的空间分布情况与地区气温的关系受多种因素综合形成,中部的山地地区地势较高,山脉迎风坡降水丰富,背风坡降水相

对较少;而鲁西南和鲁西北的平原地区气候受海拔因素影响不明显;沿海半岛地区受海洋气候的影响明显,降水量相对较大。

在本研究中,采取基于地理位置和城市分界的地域划分法,将山东省划分为鲁西北地区、鲁西南地区、鲁中地区、鲁东南地区和半岛地区五个区域^[25],其中鲁西北地区包括德州市、聊城市、东营市、滨州市,区域土地面积约 $3.70 \times 10^4 \text{ km}^2$;鲁西南地区包括菏泽市、济宁市、枣庄市,区域土地面积约 $2.80 \times 10^4 \text{ km}^2$;鲁中地区包括济南市、泰安市、淄博市、潍坊市,区域土地面积约 $4.01 \times 10^4 \text{ km}^2$;鲁东南地区包括临沂市、日照市,区域土地面积约 $2.26 \times 10^4 \text{ km}^2$;半岛地区包括青岛市、烟台市、威海市,区域土地面积约 $3.10 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

1.2 研究数据来源

选取山东省气象部门 139 个土壤水分自动观测站 2013~2019 年的逐日土壤相对湿度自动观测数据作为研究的数据基础,其中鲁西北地区共 39 个站点,鲁西南地区共 35 个站点,鲁中地区共 30 个站点,鲁东南地区共 13 个站点,半岛地区共 22 个站点(图 1);同时收集了山东省泰安、德州、日照、青岛、菏泽等国家气象观测站同期降水量、平均气温等气象观测数据。数据来自山东省气象局、山东省泰安农业气象试验站。

1.3 研究方法

1.3.1 土壤水分观测仪器 观测仪器名为自动土壤水分观测站,型号为 DZN1,传感器深度大多为地下 10、20、30、40 和 50 cm,自动土壤水分传感器利用频域反射法原理(FDR)来测定土壤体积含水量,由传感器发出 100 MHz 高频信号,传感器电容量与被测层次土壤的介电常数成函数关系,土壤中水分变化时其介电常数相应变化,传感器给出的电容值也随之变化,经过线性化和定量化处理,得出土壤水分观测值。参考中国气象局综合观测司 2010 年印发的《自动土壤水分观测规范》,本研究所使用的土壤相对湿度公式为:

$$R = \frac{w}{f_c} \times 100\%$$

其中, R 为土壤相对湿度(%), w 为土壤重量含水率(%), f_c 为田间持水量(%)。土壤水分站点较为均匀地分布在山东省区域内,其观测数据可以有效代表山东省的特征。

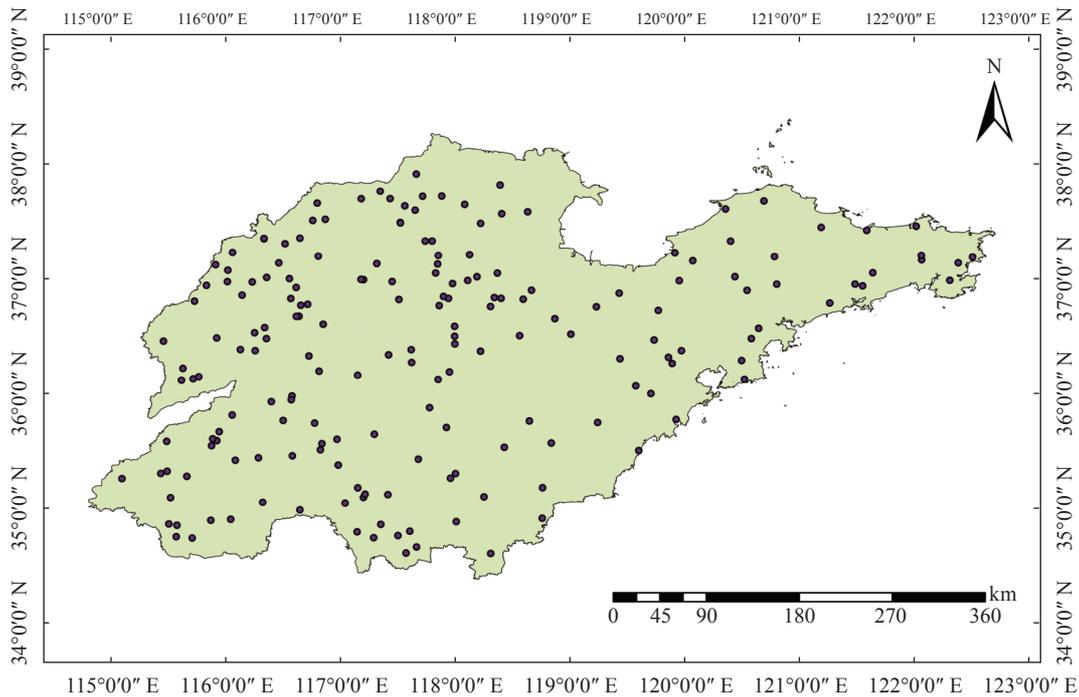


图 1 研究区域土壤水分站点分布图

Fig.1 Distribution map of soil moisture sites in the study area

1.3.2 数据处理方法 采取机器学习方法，对原始数据进行了质控和筛选，剔除原始数据中的突变数据，剔除突破极值（100%）的数据，剔除长时间无变化的数据，再通过线性插值法，将缺少的数据补足，得到质控后的数据集。利用 ArcGIS 10.2 软件，采用反距离权重空间插值法绘制土壤水分分布图，应用 MATLAB 2016b 软件采取数理分析方法分析土壤相对湿度的时空分布特征，结合山东省泰安市、菏泽市、日照市、德州市、青岛市 2013~2019 年逐月降水量和逐月平均气温，作土壤水分数据与降水量、气温等要素的相关性分析。

2 结果与分析

2.1 土壤相对湿度空间分布特征

2.1.1 土壤相对湿度区域分布特征 对 2013~2019 年 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm 等层次土壤相对湿度平均值分布情况作反距离权重空间插值分析与数理统计分析，山东省土壤水分区域变化明显（图 2），各层次土壤相对湿度均呈现半岛比内陆低的趋势，且深度越深，土壤相对湿度的空间差异越小（表 1）。半岛地区的中部较半岛地区的其他区域土壤相对湿度大，其中最大 81.17% 位于烟台福山；内陆地区的中部（鲁中山区）较内陆地区的其他区域土壤相对湿度小，其中最小

51.31% 位于潍坊安丘。在 0~50 cm 深度上对山东省各区域 2013~2019 年土壤相对湿度求平均，鲁西北地区站点为 79.65%，较全省平均 78.30% 高 1.35%；鲁中地区为 76.29%，较全省平均低 2.01%；鲁西南地区为 79.48%，较全省平均高 1.18%；鲁东南地区为 81.00%，较全省平均高 2.70%；半岛地区为 76.48%，较全省平均低 1.82%。整体而言，山东省土壤相对湿度区域分布呈现由西向东逐渐减小的趋势。

2.1.2 土壤相对湿度剖面分布特征 按照地理区划，在鲁西北地区、鲁中地区、鲁东南地区、鲁西南地区、半岛地区分别选取一个代表站点，对其 2013~2019 年的平均土壤相对湿度数据进行剖面分析，其中鲁西北地区选取德州，鲁中地区选取泰安，鲁西南地区选取菏泽，鲁东南地区选取日照，半岛地区选取青岛。结果表明，深层土壤相对湿度高于浅层土壤相对湿度，深度越深，相对湿度越大，2013 至 2019 年山东省平均土壤相对湿度纵向分布具体呈如下特征：0~10 cm 土壤相对湿度 71.71%，较 10~20 cm 低 4.82%；10~20 cm 土壤相对湿度 76.53%，较 20~30 cm 低 2.82%；20~30 cm 土壤相对湿度 79.35%，较 30~40 cm 低 1.53%；30~40 cm 土壤相对湿度 80.88%，较 40~50 cm 低 2.14%。山东省土壤水分纵向空间分布大致符合上低下高的趋势，但也有部分地区上下层相对湿度较为接近（图 3）。

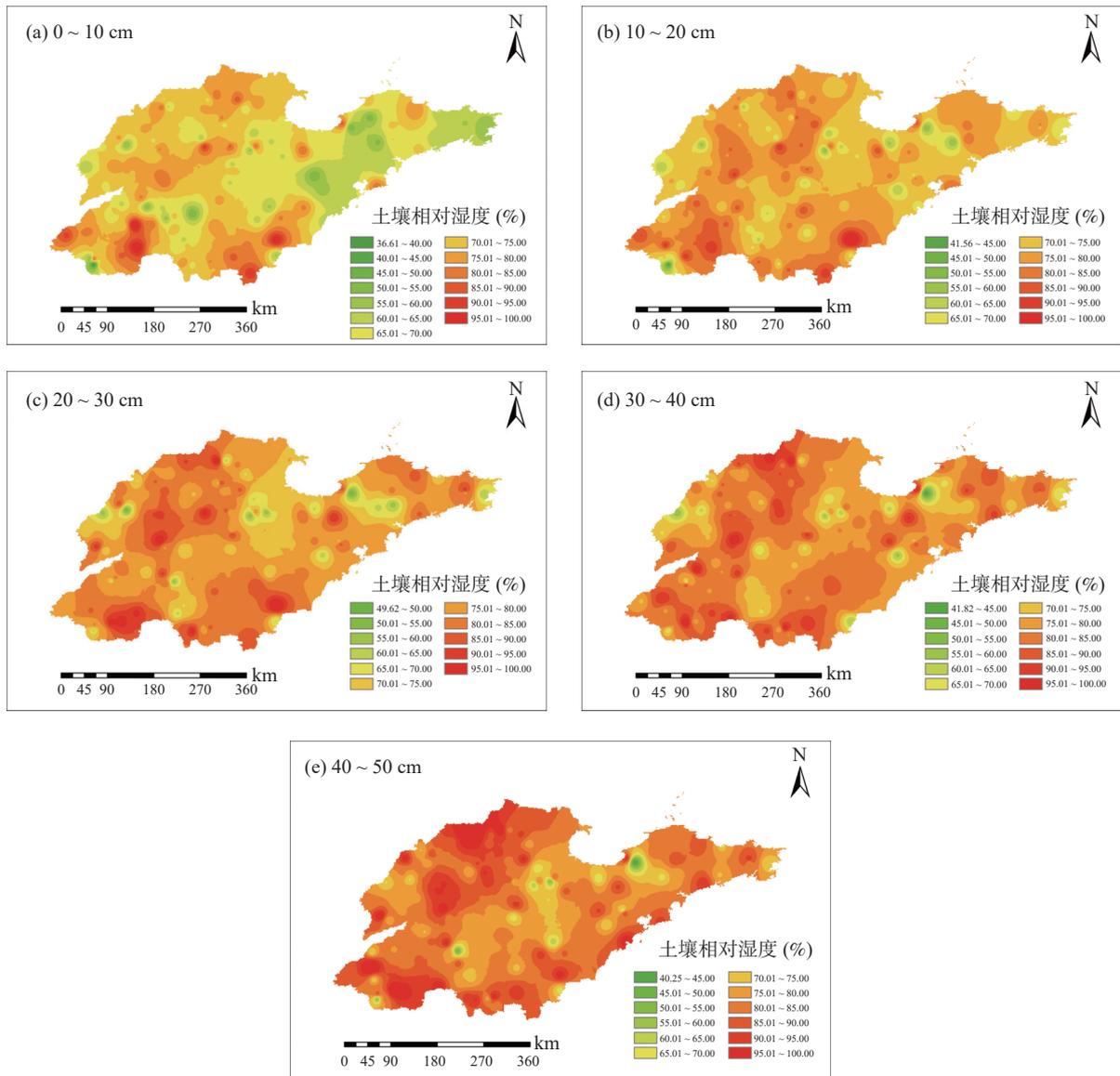


图 2 2013~2019 年不同层次土壤相对湿度平均值分布图

Fig.2 Average distribution of soil relative moisture at different levels from 2013 to 2019

表 1 山东省各区域不同层次土壤 2013~2019 年平均相对湿度(%)

Table 1 Average soil relative humidity at different levels in Shandong Province from 2013 to 2019

区域 Region	土壤层次 Soil layer				
	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	30~40 cm	40~50 cm
全省平均	71.71 (10.65)	76.53 (9.60)	79.35 (10.47)	80.88 (10.59)	83.02 (14.76)
鲁西北地区	73.09 (6.84)	76.17 (7.98)	80.05 (10.24)	81.33 (10.01)	87.63 (14.36)
鲁中地区	70.87 (9.77)	75.32 (10.06)	77.07 (10.59)	78.59 (11.11)	79.59 (10.93)
鲁西南地区	73.58 (11.56)	78.81 (8.75)	80.82 (9.53)	82.46 (9.78)	81.75 (18.06)
鲁东南地区	76.23 (12.23)	80.56 (10.30)	82.64 (9.70)	82.60 (7.40)	82.98 (9.76)
半岛地区	66.06 (9.40)	74.65 (8.37)	78.36 (11.39)	80.49 (12.24)	82.85 (12.69)

注: 表中 () 内数据为对应平均数据的标准差。

2.2 土壤相对湿度时间分布特征

2.2.1 土壤相对湿度月尺度时间分布特征

按照山东省地域分布, 在五个区域内分别选取一个代表站点, 对其各个层次的月尺度土壤相对湿度作时间分

布统计分析, 鲁西北地区选取德州, 鲁中地区选取泰安, 鲁西南地区选取菏泽, 鲁东南地区选取日照, 半岛地区选取青岛 (图 4)。对土壤相对湿度平均值差异显著性进行 t 检验, 通过双边置信水平 90% 的

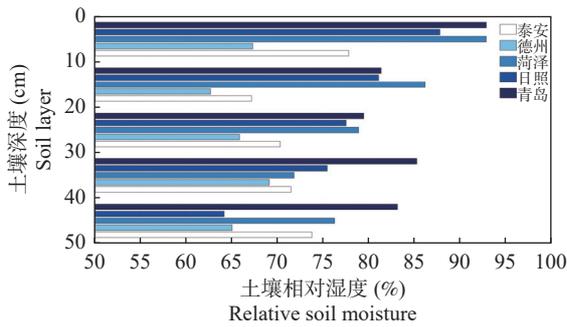


图 3 2013~2019 年不同层次土壤相对湿度平均值剖面图
Fig.3 Mean soil relative moisture profiles at different levels from 2013 to 2019

显著性检验，并标注误差线。在 30 cm 深度以上的浅层土壤中，1~8 月份平均土壤相对湿度大致呈现逐步升高的趋势，8~翌年 1 月份平均土壤相对湿度大致呈现逐步降低的趋势。8 月份土壤相对湿度一般达到最高值，0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm 全省 8 月份土壤相对湿度平均值分别为 79.33%、83.05% 和 84.25%。在 30 cm 深度以下的深层土壤中，1~12 月变化不大，全年无明显极值，大致呈现出平稳的趋势，但部分地区仍存在一定的变化，不同季节土壤相对湿度呈现出相似的变化特征，即土层深度越深，土壤相对湿度变化幅度越小。

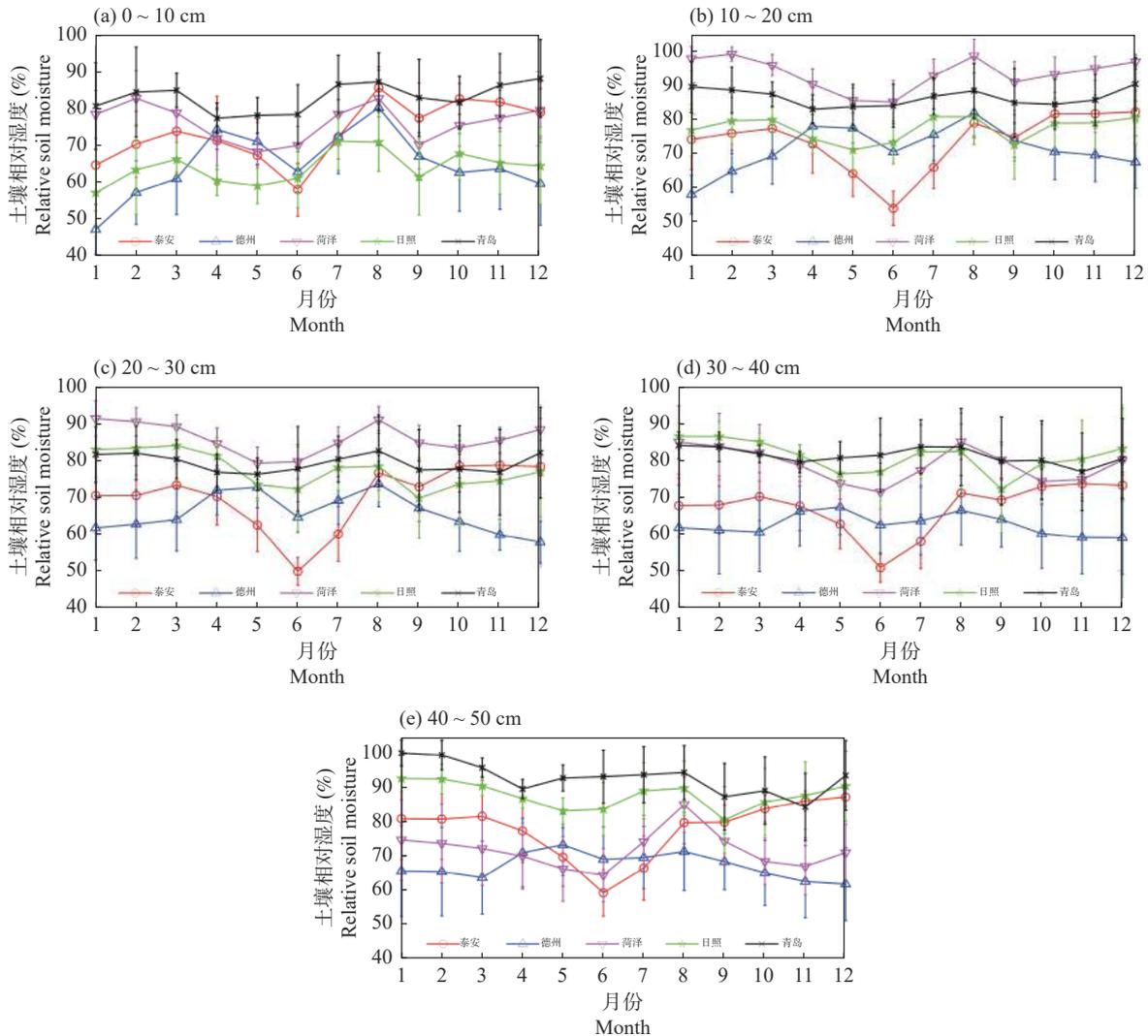


图 4 2013~2019 年部分站点各层次土壤相对湿度月平均值
Fig.4 Monthly average of relative soil moisture at different levels at some sites from 2013 to 2019

2.2.2 土壤相对湿度年尺度时间分布特征 对 2013~2019 年山东省各年份平均土壤相对湿度作统计分析，各层次土壤相对湿度年尺度变化幅度不大，2013~

2014 年及 2018~2019 年均存在土壤水分的轻微降低，其他年份变化幅度较小（表 2）。整体而言，山东省各层土壤相对湿度年尺度变异呈现轻微下降的趋势。

表 2 2013 ~ 2019 年山东省各年份不同层次土壤平均相对湿度 (%)

Table 2 Average soil relative humidity at different levels from 2013 to 2019 in Shandong Province

年份 Year	土壤层次 Soil layer				
	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	20 ~ 30 cm	30 ~ 40 cm	40 ~ 50 cm
2013	73.29	78.57	81.27	82.39	85.88
2014	71.06	75.98	79.25	80.43	83.15
2015	72.62	76.64	79.27	80.15	83.36
2016	72.65	77.20	79.75	81.19	84.17
2017	72.57	77.73	80.88	81.46	83.99
2018	72.19	78.60	81.17	82.70	84.80
2019	67.01	73.57	76.12	78.31	80.72

2.3 土壤相对湿度与气象要素的相关性分析

2.3.1 土壤相对湿度与降水量的相关性分析 对德州、泰安、菏泽、日照、青岛站点, 利用 2013 ~ 2019 年各层次土壤各月平均相对湿度和各月降水量数据作土壤相对湿度与降水量的相关性分析 (表 3)。因使用月数据研究相关性, 为了说明降水与土壤相对湿度的关系时降低年际变化的影响, 使用各月降水量和各层次土壤各月平均相对湿度的距平数据开展相关性分析。根据分析, 月平均土壤相对湿度与月降水量之间趋势大致相似, 对月平均土壤相对湿度与月降水量求相关系数, 并进行显著性检验。其中, 德州、日照、青岛站点除青岛的 40 cm 土壤层次未通过显著性检验外, 其他均通过 95% 置信水平的显著性检验, 各层次的月平均土壤相对湿度与月降水量之间的相关系数在 0.22 ~ 0.46 之间, 说明月平均土壤相对湿度与月降水量之间存在正相关关系, 但相关系数较小, 分析各层次二者的相关系数可知, 越接近表层, 相关关系越强; 泰安、菏泽两个站点, 各层次的月平均土壤相对湿度与月降水量之间的相关系数均在 0.03 ~ 0.21 之间, 且均未通过 95% 置信

表 3 2013 ~ 2019 年各月降水量与不同层次土壤月平均相对湿度间的相关系数

Table 3 Correlation coefficient between monthly precipitation and monthly mean soil relative humidity at different levels from 2013 to 2019

站点 Site	土壤层次 Soil layer				
	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	20 ~ 30 cm	30 ~ 40 cm	40 ~ 50 cm
德州	0.35*	0.32*	0.29*	0.27*	0.23*
菏泽	0.20	0.12	0.16	0.13	0.03
青岛	0.46*	0.37*	0.28*	0.17	0.23*
日照	0.35*	0.28*	0.22*	0.23*	0.24*
泰安	0.15	0.21	0.17	0.11	0.03

注: * 代表此组数据通过 95% 显著性检验。下同。

水平的显著性检验, 说明除了月降水量外, 仍有其他因素能够显著影响月平均土壤相对湿度。

选取相关性较好的德州站点, 分析春 (3 ~ 5 月)、夏 (6 ~ 8 月)、秋 (9 ~ 11 月)、冬 (12 ~ 2 月) 四季的平均土壤相对湿度与降水量之间的相关关系 (表 4)。春季各层降水量与平均土壤相对湿度之间的相关系数在 -0.0574 ~ 0.0584 之间, 均未通过 90% 置信水平的显著性检验, 说明春季降水量与各层平均土壤相对湿度之间的关系均不密切; 冬季降水量与各层平均土壤相对湿度之间的相关系数在 -0.2534 ~ 0.5307 之间, 均未通过 90% 置信水平的显著性检验, 但 10 cm 层次通过了 80% 置信水平的显著性检验, 说明冬季浅层平均土壤相对湿度与降水量存在弱相关关系, 但 20 cm 及以下层次二者之间关系不密切; 夏季降水量与各层平均土壤相对湿度之间的相关系数在 0.7633 ~ 0.9609 之间, 10 cm 至 40 cm 层次均通过 99.9% 置信水平的显著性检验, 50 cm 层次通过 98% 置信水平的显著性检验, 说明夏季各层的平均土壤相对湿度与降水量间存在显著的正相关关系; 秋季降水量与各层平均土壤相对湿度之间的相关系数在 0.6175 ~ 0.9593 之间, 10 ~ 30 cm 层次均通过 99.9% 置信水平的显著性检验, 40 cm 层次通过 95% 置信水平的显著性检验, 50 cm 层次通过 90% 置信水平的显著性检验, 说明秋季各层的平均土壤相对湿度与降水量间存在显著的正相关关系, 浅层二者的相关关系更显著。分析可知, 夏、秋两季各层平均土壤相对湿度与降水量之间存在显著的正相关关系。这说明夏、秋两季平均土壤相对湿度受降水量影响较大, 冬、春季则影响较小。造成此种分异的原因可能与山东省降水在夏、秋两季较为集中有关。

表 4 德州各季节降水量与不同层次土壤相对湿度间的相关系数

Table 4 Correlation coefficient between seasonal precipitation and soil relative humidity at different levels in Dezhou

季节 Season	土壤层次 Soil layer				
	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	20 ~ 30 cm	30 ~ 40 cm	40 ~ 50 cm
春季	0.0584	0.0040	0.0406	-0.0574	0.0194
夏季	0.8742	0.9312	0.9609	0.8992	0.7633
秋季	0.9441	0.9593	0.9000	0.7149	0.6175
冬季	0.5307	0.4597	0.2166	-0.1628	-0.2534

2.3.2 土壤相对湿度与月平均气温的相关性分析

对德州、泰安、菏泽、日照、青岛站点分别利用 2013 ~ 2019 年各月平均土壤相对湿度和各月平均气

温数据作土壤水分与平均气温的相关性分析(表 5)。因使用月数据研究相关性,为了说明平均气温与土壤相对湿度的关系时降低年际变化的影响,因此使用各月平均气温和各层次各月平均土壤相对湿度的距平数据开展相关性分析。根据分析,各站点平均气温与土壤相对湿度在月时间尺度上的相关系数在-0.23~0.33 之间,且各站点的平均气温与各层次土壤相对湿度的相关系数大多未通过 90% 置信水平的显著性检验,相关系数一致偏低,相关关系不显著。

表 5 2013~2019 年各月平均气温与不同层次土壤月平均相对湿度间的相关系数

Table 5 Correlation coefficients between monthly mean air temperature and monthly mean soil relative humidity at different levels from 2013 to 2019

站点 Site	土壤层次 Soil layer				
	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	30~40 cm	40~50 cm
德州	-0.17	-0.21	-0.23*	-0.22*	-0.20
菏泽	-0.13	0.17	0.12	0.18	0.03
青岛	-0.17	-0.13	0.01	0.11	-0.15
日照	0.02	0.05	-0.14	-0.03	-0.04
泰安	0.25*	0.12	0.21	0.27*	0.33*

选取德州站点,分析春(3~5月)、夏(6~8月)、秋(9~11月)、冬(12~2月)四季的平均土壤相对湿度与平均温度之间的相关关系(表 6)。各季节各层次平均气温与土壤相对湿度的相关系数在-0.5242~0.4848 之间,且均未通过 90% 置信水平的显著性检验,由此可知,土壤的相对湿度与平均气温在季节尺度上几乎不相关。

表 6 德州各季节平均气温与不同层次土壤相对湿度间的相关系数

Table 6 Correlation coefficient between seasonal average temperature and soil relative humidity at different levels in Dezhou

季节 Season	土壤层次 Soil layer				
	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	30~40 cm	40~50 cm
春季	-0.4103	-0.2963	-0.1262	-0.1172	0.0115
夏季	0.3696	0.2688	0.4626	0.2544	0.1968
秋季	-0.5242	-0.4781	-0.3113	-0.1441	-0.0849
冬季	0.4848	0.3641	0.1770	0.2427	0.1556

3 讨论

土壤水分是重要的生态因子之一,在加强干旱、洪涝等灾害的监测和预警能力,提高指导农业生产的水平,在作物生长关键期实施较为精确的水肥管

理,提高农业生产的质量与效率方面均具有指导性意义。

本研究表明山东省土壤水分区域和剖面变化明显,区域分布整体呈现由西向东逐渐减小的趋势,深度越深,土壤相对湿度的空间差异越小,剖面分布则呈现深层土壤相对湿度高于浅层土壤相对湿度的趋势。吴东丽等^[14]研究发现,2016 年山东省不同层次的土壤水分含量呈现山东东部半岛低于中、西部的规律,表层土壤水分含量较深层低,这与本研究的结论较为一致;但吴东丽^[14]的研究同时发现,同一层次相比较,表层的土壤含水量的空间差异要小于深层,这与本研究中深度越深土壤相对湿度的空间差异越小的结果不一致,其原因可能是本研究基于长期定位观测试验,连续多年的实时的观测数据,减少了年际变化和突发性因素的影响,降低了使用短期试验数据的偶然性。许多学者分别对黄土高原、塔里木河下游等地的土壤水分垂直变化进行了研究,发现土壤水分存在垂直变化性,深度越深,垂直分布越明显^[26-28],这与本研究中剖面分布呈现深层土壤相对湿度高于浅层土壤相对湿度的趋势的结论较为相符。

山东省土壤相对湿度在月尺度上的变化特征因土层深度而异,各层土壤相对湿度年尺度变异呈现轻微下降的趋势。赵琛^[29]研究发现在月尺度上黑河上游地区表层 0~10 cm 的土壤水分变异性较大,随着土层深度的增加,变异系数逐渐减小,这与本研究的结论较为一致;吴振宗等^[30]研究发现,在 2001~2020 年的 20 年间,山东省土壤水分存在下降趋势,这与本研究的结论较为一致。

山东省月平均土壤相对湿度受降水量影响明显,受平均气温影响不明显。Cho 等^[31]研究发现朝鲜半岛区域内反映土壤湿度空间变异性的土壤含水量相对差值标准差(SDRDt)与日平均降水量呈正相关,与日照时数、气温和地温呈负相关,本研究在与月降水量相关性的结论上与之相符,但在月平均气温的研究中展现出了较低的相关性,这可能与研究地区不同、研究时间尺度不同等有关。

综上所述,自动土壤水分观测数据强化了数据基础,可以更深入地挖掘区域土壤水分时空分布特征,但根据数据时间尺度选取、研究区域确定、影响因素引入的不同,得到的研究结果也可能存在差异。

4 结论

(1) 山东省土壤水分区域和垂直变化明显, 各时段土壤相对湿度分布整体呈现由西向东逐渐减小的趋势, 深度越深, 土壤相对湿度的空间差异越小; 垂直分布则呈现随土层加深而增加的趋势。

(2) 山东省土壤水分月尺度时间变化特征因土层深度而异, 一年内 0~30 cm 土层土壤相对湿度 1 月~8 月逐步升高, 8 月~翌年 1 月逐步降低; 而 30~50 cm 土层土壤相对湿度变化较小。在年尺度时间变化特征方面, 各土层年均土壤相对湿度表现出逐年下降的趋势。

(3) 山东省土壤相对湿度主要受降水量影响, 在月尺度上土壤相对湿度与月降水量之间存在弱的正相关关系, 在季节尺度上夏、秋两季各土层月平均相对湿度与当月降水量之间显著正相关; 平均气温与土壤相对湿度在月时间尺度和季节时间尺度上的相关关系不显著。

参考文献:

- [1] 李小雁. 干旱地区土壤-植被-水文耦合、响应与适应机制[J]. 中国科学:地球科学, 2011, 41(12): 1721-1730.
- [2] 吕明侠, 王一博, 刘国华. 黑河上游高山区浅层土壤水分变化及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2020, 37(4): 899-907.
- [3] 吴泽棉, 邱建秀, 刘苏峡, 等. 基于土壤水分的农业干旱监测研究进展[J]. 地理科学进展, 2020, 39(10): 1758-1769.
- [4] Fatholouloumi S, Vaezi A R, Alavipanah S K, et al. Comparison of spectral and spatial-based approaches for mapping the local variation of soil moisture in a semi-arid mountainous area[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 724: 138319.
- [5] McColl, Kaighin A, Alemohammad, et al. The global distribution and dynamics of surface soil moisture[J]. *Nature Geoscience*, 2017, 10(2): 100-104.
- [6] 中国气象局. 中国气象灾害年鉴(2018) [M]. 北京: 气象出版社, 2019.
- [7] 李莹, 赵珊珊. 2001~2020年中国洪涝灾害损失与致灾危险性研究[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(2): 154-165.
- [8] Duan, WeiliHe, BinSahu, et al. Spatiotemporal variability of Hokkaido's seasonal precipitation in recent decades and connection to water vapour flux[J]. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 2017, 37(9): 3660-3673.
- [9] 何洁, 严友进, 易兴松, 等. 喀斯特地区土壤异质性及其与植物相互作用[J]. 应用生态学报, 2021, 32(6): 2249-2258.
- [10] M A Perry, J D Niemann. Analysis and estimation of soil moisture at the catchment scale using EOFs[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 334(3): 388-404.
- [11] 冉有华, 李新, 王维真, 等. 黑河流域临泽盐碱化草地网格尺度多层土壤水分时空稳定性分析[J]. 地球科学进展, 2009, 24(7): 817-824.
- [12] W Hu, M A Shao, F P Han, et al. Watershed scale temporal stability of soil water content[J]. *Geoderma*, 2010, 158(3): 181-198.
- [13] A Gómez - Plaza, J Alvarez - Rogel, J Albaladejo, et al. Spatial patterns and temporal stability of soil moisture across a range of scales in a semi - arid environment[J]. *Hydrological Processes*, 2000, 14(7): 1261-1277.
- [14] 吴东丽, 李琪, 薛红喜, 等. 山东省土壤水分时空分布规律及分区[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(3): 639-645.
- [15] 赵梦凡, 颜亮东. 自动与人工观测土壤水分差异对比分析[J]. 中国农学通报, 2020, 36(7): 90-98.
- [16] 罗珠珠, 牛伊宁, 李玲玲, 等. 陇中黄土高原不同种植年限苜蓿草地土壤水分及产量响应[J]. 草业学报, 2015, 24(1): 31-38.
- [17] 马鹏毅, 赵家锐, 何威明, 等. 黄土高原不同树龄苹果园土壤水分及硝态氮剖面特征[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3): 192-198, 214.
- [18] 唐敏, 赵西宁, 高晓东, 等. 黄土丘陵区不同土地利用类型土壤水分变化特征[J]. 应用生态学报, 2018, 29(3): 765-774.
- [19] 王国梁, 刘国彬, 党小虎. 黄土丘陵区不同土地利用方式对土壤含水率的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 31-35.
- [20] 杨磊, 卫伟, 陈利顶, 等. 黄土丘陵沟壑区深层土壤水分空间变异及其影响因子[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(4): 355-362.
- [21] 张瑞, 曹华, 王云强, 等. 黄土丘陵沟壑区小流域土壤水分空间变异性及其影响因素[J]. 水土保持研究, 2012, 19(5): 52-58.
- [22] 张志南, 武高林, 王冬, 等. 黄土高原半干旱区天然草地群落结构与土壤水分关系[J]. 草业学报, 2014, 23(6): 313-319.
- [23] 褚越, 薛晓萍, 张丽娟, 等. 山东省干旱灾害风险评估与区划[J]. 中国农学通报, 2023, 39(10): 101-112.
- [24] 刘玉丽. 山东省小麦产量差的时空变异研究[D]. 济宁: 曲阜师范大学, 2022.
- [25] 邹树峰, 薛德强, 陈艳春, 等. 不同气象业务对山东省区域划分[J]. 山东气象, 2001, (3): 20-22, 31.
- [26] 程一本, 肖洪浪, 李双. 黄土丘陵风沙区柽柳(*Tamarix chinensis*)林土壤水储量动态[J]. 中国沙漠, 2015, 35(2): 407-413.
- [27] 王云强, 邵明安, 刘志鹏. 黄土高原区域尺度土壤水分空间变异性[J]. 水科学进展, 2012, 23(3): 310-316.
- [28] 马晓东, 李卫红, 朱成刚, 等. 塔里木河下游土壤水分与植被时空变化特征[J]. 生态学报, 2010, 30(15): 4035-4045.
- [29] 赵琛. 黑河上游土壤水分时空变异性及其估算研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2015.
- [30] 吴振宗, 毕健, 高艺菲, 等. 近20 a中国中东部部分农业区土壤水分变化[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2022, 58(6): 774-781, 788.
- [31] Cho E, Choi M. Regional scale spatio-temporal variability of soil moisture and its relationship with meteorological factors over the Korean peninsula[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 516: 317-329.

Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Soil Relative Humidity in Shandong Province

SHI Zhao-peng^{1,2}, YANG Di-wen², CUI Zhao-yun¹, LI Rui-jie³, YANG Li-juan^{2*}

(1. *Tai'an Meteorological Bureau, Tai'an 271000, China*; 2. *College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China*; 3. *Tai'an Forestry Protection and Development Center, Tai'an 271000, China*)

Abstract: [Objective] The paper aims to clarify the spatio-temporal characteristics of soil relative humidity in 0 - 50 cm soil layer in Shandong Province and its relationship with meteorological factors, so as to provide support for agricultural production development. [Method] Daily soil relative humidity data and meteorological observation data from 2013 to 2019 observed by 139 automatic soil moisture observation stations in Shandong Province were used to explore the spatial changes of soil relative humidity at different depths at different time periods by using inverse distance weight spatial interpolation, and the correlation analysis was carried out between the relative humidity and meteorological elements. [Result] The relative soil moisture distribution of cultivated land in Shandong Province gradually decreased from west to east, and the vertical distribution showed an increasing trend with the deepening of soil layer. The relative soil moisture of 0 - 30 cm layer in one year gradually increased from January to August, and gradually decreased from August to January of the next year. The soil relative humidity of 30 - 50 cm layer had little change. The average annual relative soil moisture of each soil layer showed a decreasing trend year by year. There was a significant positive correlation between the monthly average relative humidity of each soil layer and the monthly precipitation in summer and autumn. [Conclusion] The monthly average relative soil moisture of cultivated land in Shandong Province changed significantly in horizontal and vertical directions, and the vertical changes mainly occurred in the 0 - 30 cm soil layer. The annual average relative soil moisture showed a trend of decrease year by year from 2013 to 2019, and the relative soil moisture was mainly affected by precipitation.

Key words: Soil moisture; Spatial and temporal distribution; Shandong Province; Meteorological element

[责任编辑: 韩春兰]