

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.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2019.03.019

山东省土壤水分时空分布规律及分区

吴东丽^{1,2}, 李 琪³, 薛红喜⁴, 沈 超^{1,2}, 丁 琦³

(1. 中国气象局/河南省农业气象保障与应用技术重点实验室, 河南 郑州 450003; 2. 中国气象局气象探测中心, 北京 100081;

3. 南京信息工程大学/江苏省农业气象重点实验室, 江苏 南京 210044; 4. 中国气象局国家气象中心, 北京 100081)

摘要: 为了充分发挥土壤水分自动观测数据在气象业务和科研工作中的作用, 本研究以山东省为例, 研究了土壤水分的时空分布规律, 并利用 K 聚类分析方法进行了分区研究。结果表明 2016 年山东省不同层次土壤的水分含量呈现出东部半岛低于中、西部的规律; 表层的土壤水分含量较低, 且土壤含水量的空间差异小于深层。海阳和章丘 2 个典型站点表层土壤水分的波动较下层更明显; 气温、相对湿度、气压、降水和土壤温度等气象因子在不同层次上对土壤水分含量有明显的影响。利用 K 聚类分析方法结合站点的空间分布情况, 可以将山东省分为 4 个区域, 并在东西方向上依次分布。

关键词: 土壤水分; 时空分布; 分区; K 聚类

中图分类号: F319.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2019)03-0639-07

Spatial and temporal distribution and zoning of soil moisture in Shandong province

WU Dong-li^{1,2}, LI Qi³, XUE Hong-xi⁴, SHEN Chao^{1,2}, DING Qi³

(1. China Meteorological Administration/Henan Key Laboratory of Agrometeorological Support and Applied Technique, Zhengzhou 450003, China; 2. Meteorological Observation Centre of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 3. Nanjing University of Information Science & Technology/Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing 210044, China; 4. National Meteorological Center of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to optimize the use of soil moisture automatic observation data in the meteorological services and relevant scientific research, the spatial and temporal distribution of soil moisture was investigated in Shandong province, and the zoning research of soil moisture in the province was carried out using the K-means clustering. The results showed that soil moisture contents at different depths in the eastern peninsula were lower than those in the middle and western regions of Shandong in 2016. The surface soil moisture content was low, and the spatial variation of soil moisture contents in the surface soil layer was lower than that in the deep soil layer. The fluctuation of soil moisture in surface layer was more obvious than that in the deep soil layer in Haiyang and Zhanqiu. Meteorological factors, such as temperature, relative humidity, air pressure, precipitation and soil temperature,

showed the significant influence on soil moisture contents at different depths. After soil moisture data were used to group all stations into clusters using the K-means clustering method, the Shandong province could be classified into four regions distributing in an east-west direction.

Key words: soil moisture; spatial and temporal distribution; zoning; K-means clustering

收稿日期: 2018-10-12

基金项目: 中国气象局农业气象保障与应用技术重点开放实验室开放研究基金项目 (AMF201606); 公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY201506001); 中国气象局气象探测中心生态环境观测技术创新团队资助项目

作者简介: 吴东丽 (1977-), 女, 山西曲沃人, 博士, 研究员, 主要研究农业气象自动化观测。 (E-mail) wudongli666@126.com

通讯作者: 薛红喜 (1978-), (E-mail) xuehongxi@126.com

水分是土壤的一个重要组成部分,是农业和自然生态系统中影响植物生产力的重要指标,它不仅影响土壤的理化性质,而且影响土壤物质的传输和转移,尤其制约着土壤中养分的溶解、转移^[1-3]。土壤水分也是研究农业干旱的重要指标,掌握土壤水分动态变化规律,有利于对干旱进行监测和预警^[4]。土壤水分还是重要的生态因子之一,它与降水和气温变化是相互的和密不可分的,是对气候环境因子变异最敏感的响应指标之一^[5-7],土壤水分研究对认识陆面水分输送特征、形成机制以及改进陆面模式、土壤湿度反演模型具有指导性意义^[8-10]。

已有的研究在土壤水分平衡^[11]、时空分布和变异^[12-13]、影响因素^[14]等方面积累了大量的成果。虽然使用遥感技术在大尺度土壤水分研究中的范例越来越多^[15],但土壤水分的原位、长时间观测仍然是精确获取资料和数据的重要手段。近年来随着土壤水分自动观测仪器的不断更新,为土壤水分研究提供了高频次、长时间序列的数据资料,并广泛应用于遥感反演土壤水分产品的验证,土壤水分和干旱模型的标定和验证以及揭示土壤水分的时空分布规律^[16-19]。

中国气象部门传统的土壤水分观测采用人工方式,间隔时间长,不能很好地显示土壤水分的时间动态变化,并且对观测点的土壤有一定的破坏,已经无法满足气象观测业务发展和科研的需求^[20]。自 2009 年开始,中国气象局启动了土壤水分自动观测台站的建设,截止 2017 年底已建成近 2 000 个土壤水分自动观测站,观测间隔为 1 h,目前已经获取了大量的第一手观测资料,初步形成了全国土壤水分自动观测网。为了充分发挥自动观测数据在业务和科研工作中的作用,本研究以山东省为例,利用 2016 年山东省自动观测站的土壤水分观测数据,进行土壤水分时空分布规律及分区研究,从而为进一步挖掘土壤水分自动观测数据的价值,促进数据的业务化以及科研成果产出提供参考。

1 数据处理

本研究选取观测到的土壤相对含水量(SWC)进行分析。首先对山东省 141 个土壤水分自动观测站 2016 年的观测数据进行筛选,剔除每天观测不足 20 次,每年观测不足 360 d 的站点,筛选出 85 个站点。对 85 个站点的土壤水分数据(小时值)进行质

量控制,依次进行极值检查(土壤相对含水量的范围为 $[0,100]$)、内部一致性检查(同时检验观测到的土壤体积含水量、土壤质量含水量、土壤相对含水量的一致性)和时间一致性检查(10~30 cm 连续 21 h 土壤相对含水量无变化的,40~60 cm 连续 31 h 无变化的,80~100 cm 连续 120 h 无变化的,全部连续相等的数据判为异常值),剔除异常值后,利用前后数据采用线性插值法进行插补,得到完整的数据值,然后分别计算土壤相对含水量的日、旬、月和年均值。

利用 GIS 软件研究土壤水分的空间分布特征,利用 Sufer 软件研究土壤水分的时间分布特征。另外选取了与气象观测站点匹配较好的海阳和章丘的日值数据进行土壤水分与气象要素的相关性分析。

因为 10 cm 和 20 cm 的土壤水分受多种因素的影响,稳定性不高,规律性不好,因此用 30 cm 的土壤水分月平均值,采用 K 聚类分析方法^[21]结合站点空间分布情况进行土壤水分的分区研究。

2 结果与分析

2.1 土壤水分的时空分布规律

图 1 是 2016 年山东省不同层次土壤水分的年均值分布情况。从图 1 可以看出,山东省不同层次的土壤水分含量有较明显的空间分异特征,呈现出山东东部半岛的土壤水分含量低于中、西部的规律。表层的土壤水分含量较低,越往深层,土壤水分含量越高,另外从同一层次土壤含水量的变幅来看,表层的土壤含水量的空间差异要小于深层的。

本研究分别选取了山东半岛的海阳和中西部的章丘 2 个典型站点,分析这 2 个站点 2016 年不同深度下土壤含水量的垂直分布特征及旬变化情况。从图 2 可以看出,2016 年山东半岛海阳站点表层(10 cm、20 cm)土壤水分在全年的波动剧烈,中下层波动较小,从旬值的极差也可以看出,各层土壤水分在全年都有一定幅度的变化(表 1)。海阳站点土壤水分的最高值出现在 60 cm 处,最低值在 10 cm 处,各层之间土壤水分平均值的差异比较明显。

章丘站点的土壤表层(10 cm)土壤水分在全年的波动较大,20 cm 以下土壤水分波动迅速减小,80 cm 以下的深层土壤水分在全年的波动极小,基本保持一致(图 2、表 1)。土壤水分平均值的最高值在 80 cm 处,最低值在 50 cm 处,但各层土壤水分平均

值之间的差异很小。

对比 2 个典型站点的土壤水分含量可以(图 2、表 1)看出,海阳站点 30 cm 以上的土壤水分含量低

于章丘站点,但 30 cm 以下的土壤水分含量高于章丘站点。章丘站点的土壤水分含量在时间上和垂直剖面上的变化幅度都小于海阳站点。

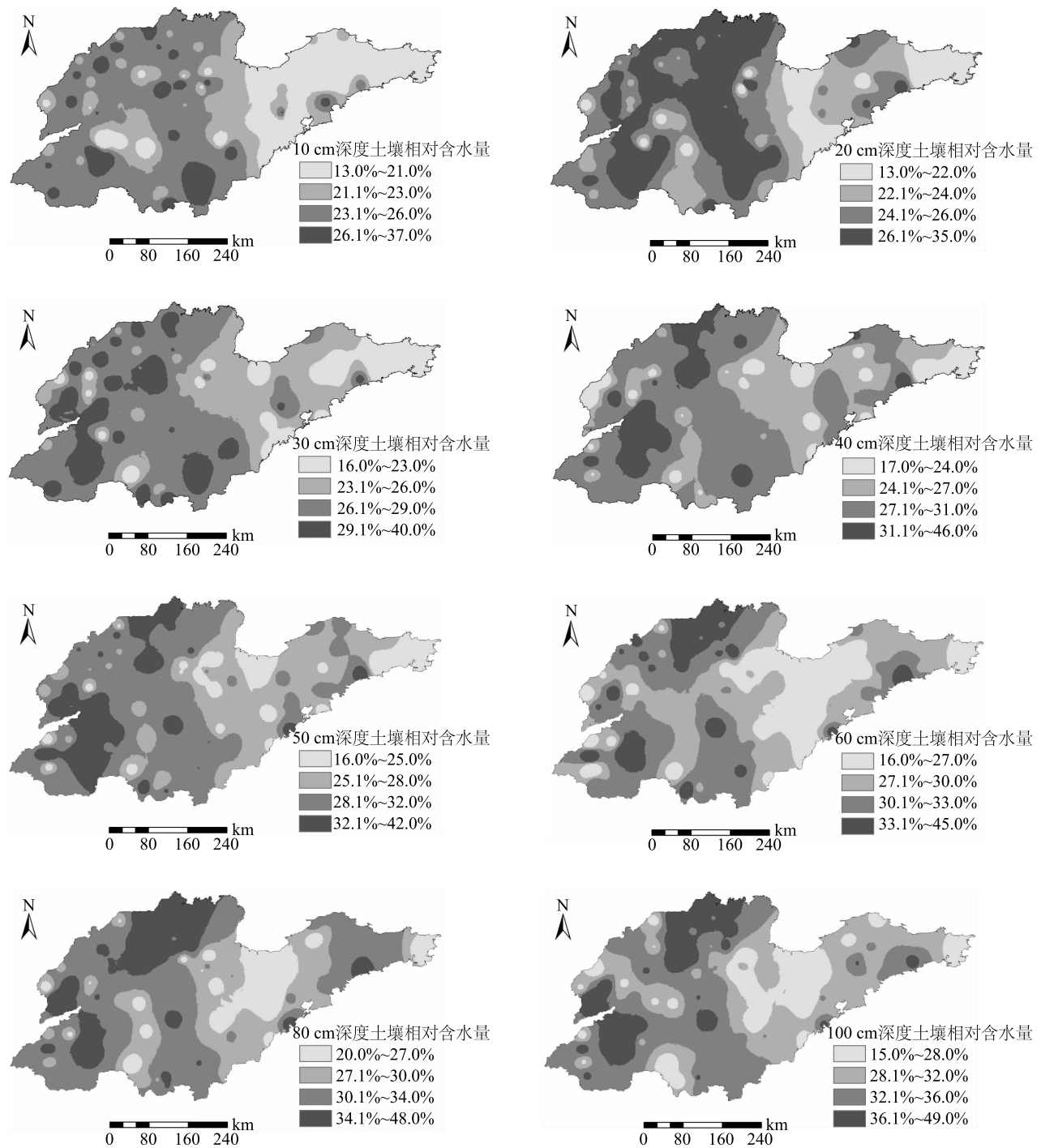


图 1 不同层次土壤相对含水量的年均值空间分布

Fig.1 Spatial distribution of annual mean values of soil relative water content in different layers

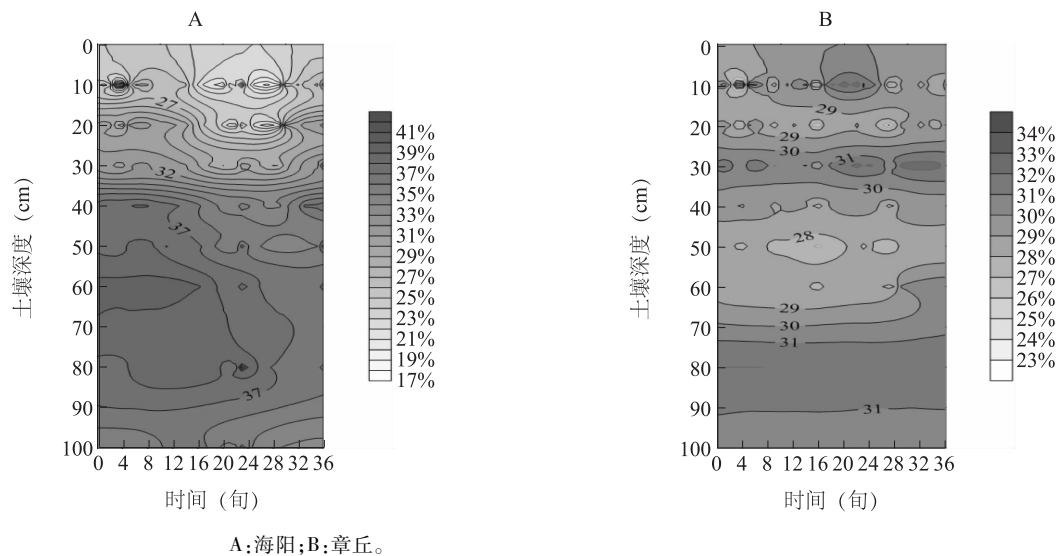


图 2 土壤相对含水量在剖面上的时间变化

Fig.2 Time variation of soil relative water content in profile

表 1 海阳和章丘站点土壤水分旬值统计

Table 1 Statistics of soil water ten-day values in Haiyang and Zhangqiu

土壤深度 (cm)	海阳站点土壤水分旬值(%)				章丘站点土壤水分旬值(%)			
	平均	最大	最小	极差	平均	最大	最小	极差
10	24.0	29.1	17.4	11.7	29.5	33.0	22.5	10.5
20	27.7	31.6	21.5	10.1	28.5	30.3	25.9	4.4
30	30.4	34.6	28.0	6.6	31.4	32.7	29.3	3.4
40	36.2	38.2	33.7	4.4	29.2	29.9	27.5	2.4
50	36.5	38.5	34.5	4.0	28.0	28.6	26.7	1.9
60	38.2	39.8	36.5	3.3	28.8	31.1	27.6	3.5
80	37.8	41.3	35.8	5.5	31.8	32.0	31.4	0.6
100	35.1	37.5	33.6	3.9	30.4	30.7	30.0	0.7

2.2 土壤水分含量与气象要素的关系

从表 2 可以看出,海阳站点不同深度土壤水分含量与气象要素之间有较强的相关关系,其中温度、湿度和气压与土壤水分含量之间的关系大多达到了极显著的相关水平。温度和气压与中上层土壤(60 cm 及以上)的水分含量之间是负相关关系,降水对 20~40 cm 的土壤含水量有明显的影响。

从表 3 可以看出,章丘站点土壤除 100 cm 深度外,其余各层土壤水分含量与温度、湿度和气压之间的相关关系大多达到了极显著水平。降水对土壤水分的影响较小,只是和表层的土壤水分含量之间有明显的相关性,风速和日照对土壤水分的影响也较小。

2.3 土壤水分分区研究

利用 K 聚类分析方法,对站点 30 cm 的土壤水分月平均值进行处理和分析,并参考站点的空间分布情况,可以将山东省分为东部和中西部 2 大区域。然后对中西部的大类区再进行一次 K 聚类分析,又可以分为 2 类,这 2 类中有一类在空间分布上不连续,考虑到分区空间连续性原则,因此将中西部调整为 3 类,从而得到了山东省土壤水分的最终分区结果(图 3),其中 I 区为第一次 K 聚类直接分出来的,Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ区为第二次分类得到的。

从分区的结果来看,4 个区域在东西方向上依次分布,Ⅰ类区为山东半岛水分含量低值区,分布在山东半岛,包括威海、烟台、青岛全市以及潍坊

和日照的东部区域;Ⅱ类区为中部水分含量中低值区,位于山东省的中部,包括东营、滨州、莱芜、淄博、临沂全市,济南和德州的大部,泰安、济宁的东部以及潍坊和日照的西部区域;Ⅲ类区为中西

部水分含量高值区,在山东省的中西部,包括聊城、枣庄全市,济宁的大部以及济南、德州、泰安的西部;Ⅳ类区为西南部水分含量高值区,在山东的西南部,包括菏泽市。

表2 海阳站点不同深度土壤相对含水量与气象要素的相关性

Table 2 Correlation between soil relative water content and meteorological elements at different depths in Haiyang

深度 (cm)	平均 温度	最高 温度	最低 温度	降水	气压	平均相 对湿度	最小相 对湿度	平均 风速	日照 时数	平均 地温	最高 地温	最低 地温
10	-0.360 **	-0.356 **	-0.362 **	-0.006	-0.109 *	-0.223 **	-0.192 **	0.014	-0.028	-0.373 **	-0.356 **	-0.366 **
20	-0.717 **	-0.692 **	-0.726 **	-0.115 *	-0.282 **	-0.398 **	-0.369 **	0.020	-0.017	-0.698 **	-0.585 **	-0.735 **
30	-0.658 **	-0.629 **	-0.674 **	-0.119 *	-0.217 **	-0.444 **	-0.424 **	0.007	0.047	-0.643 **	-0.538 **	-0.682 **
40	-0.720 **	-0.691 **	-0.731 **	-0.132 *	-0.279 **	-0.422 **	-0.402 **	-0.006	0.044	-0.678 **	-0.533 **	-0.734 **
50	-0.300 **	-0.275 **	-0.316 **	-0.053	0.029	-0.346 **	-0.345 **	0.006	0.135 **	-0.241 **	-0.101	-0.335 **
60	-0.160 **	-0.135 **	-0.180 **	-0.068	0.119 *	-0.315 **	-0.316 **	0.015	0.171 **	-0.094	0.058	-0.208 **
80	0.340 **	0.354 **	0.318 **	0.019	0.390 **	-0.126 *	-0.139 **	-0.008	0.166 **	0.367 **	0.416 **	0.290 **
100	0.223 **	0.239 **	0.200 **	-0.029	0.310 **	-0.187 **	-0.193 **	0.004	0.156 **	0.256 **	0.327 **	0.166 **

** 和 * 分别表示极显著和显著相关。

表3 章丘站点不同深度土壤相对含水量与气象要素的相关性

Table 3 Correlation between soil relative water content and meteorological elements at different depths in Zhangqiu

深度 (cm)	平均 温度	最高 温度	最低 温度	降水	气压	平均相 对湿度	最小相 对湿度	平均 风速	日照 时数	平均 地温	最高 地温	最低 地温
10	0.367 **	0.351 **	0.382 **	0.257 **	0.141 **	0.349 **	0.293 **	-0.035	0.054	0.343 **	0.210 **	0.420 **
20	-0.165 **	-0.175 **	-0.148 **	0.126 *	-0.202 **	0.192 **	0.162 **	-0.010	-0.051	-0.199 **	-0.279 **	-0.113 *
30	-0.178 **	-0.200 **	-0.150 **	0.015	-0.401 **	0.374 **	0.335 **	-0.167 **	-0.124 *	-0.229 **	-0.345 **	-0.101
40	-0.334 **	-0.344 **	-0.322 **	-0.055	-0.363 **	0.126 *	0.117 *	-0.047	-0.091	-0.376 **	-0.425 **	-0.301 **
50	-0.379 **	-0.388 **	-0.365 **	-0.086	-0.422 **	0.151 **	0.134 *	-0.072	-0.120 *	-0.426 **	-0.472 **	-0.345 **
60	-0.450 **	-0.468 **	-0.428 **	-0.098	-0.503 **	0.229 **	0.212 **	-0.085	-0.211 **	-0.504 **	-0.564 **	-0.407 **
80	-0.542 **	-0.532 **	-0.546 **	-0.094	-0.281 **	-0.234 **	-0.195 **	0.112 *	-0.071	-0.565 **	-0.502 **	-0.570 **
100	-0.010	-0.013	-0.008	-0.002	-0.011	0.056	0.056	0.053	-0.012	-0.035	-0.086	-0.004

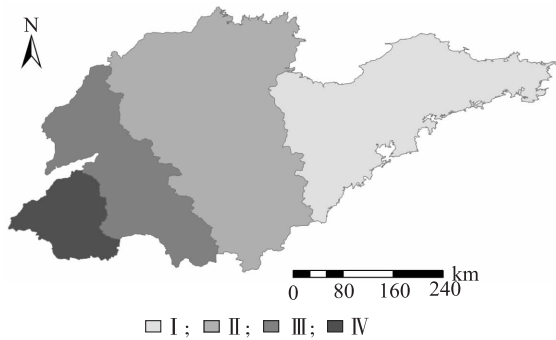
** 和 * 分别表示极显著和显著相关。

图4为4个区域的土壤水分含量月均值的变化。从图中可以看出,4个区域的土壤水分含量年内变化规则较一致,都有2个较明显的起伏,但Ⅰ类区的低值点分别在6月和9月,而Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ类区的低值点分别在5月和9月;Ⅱ、Ⅲ类区在1~3月有一个上升的过程,而Ⅳ类区在同期是一直下降的;另外从图中也可以看出,4个区域的土壤水分含量月均值还是有较明显的差异的。

3 讨论

(1)土壤水分的垂直变化特征是表征土壤性状

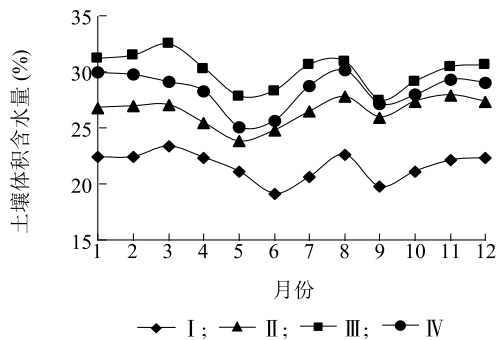
的重要方面,它可以揭示土壤湿度垂直分布的年际变化规律及水循环特征,探讨土壤湿度对降水、蒸发响应的差异,并为改善陆面过程模式中的土壤湿度参数提供可靠依据^[22-24]。按张秀芝等提出的土壤湿度垂直分布类型^[22],海阳站点土壤湿度属于垂直急剧变化型,土壤上部的垂直梯度较大;章丘站点土壤湿度属于夏季垂直均匀型,土壤水分的垂直分布较一致。土壤水分自动观测数据得到的结果与垂直分布类型较吻合,说明经质量控制过的土壤水分自动观测数据较为可靠,可以为相关的业务和科研工作提供有力的支撑。



I: 山东半岛土壤水分含量低值区; II: 中部土壤水分含量中低值区; III: 中西部土壤水分含量高值区; IV: 西南部土壤水分含量高值区。

图3 山东省土壤水分分区

Fig.3 Soil moisture zoning in Shandong province



I、II、III、IV见图3注。

图4 不同区域的土壤相对含水量月均值变化

Fig.4 Monthly mean change of soil relative water content in different regions

(2)有关土壤水分与气象要素之间关系的研究成果已有很多,本研究结果显示,温度(气温和地温)与土壤水分之间有明显的负相关关系,这与方文松等^[25]、Cho等^[26]的研究结果一致。本研究结果也表明浅层的土壤含水量与降水有关,降水可以直接补充土壤水分,提高土壤墒情,尤其是浅层土壤水分,但是海阳站点土壤含水量与降水量呈显著的负相关关系,这与前人的结论相反^[20,26-27]。这可能与所研究数据的时间尺度(本研究是日尺度,前人的结论是年尺度)、区域水分特征、土地利用类型以及其他影响因素(如蒸发蒸腾)等有关^[28]。另外本研究结果还显示,在不同地区的不同层次土壤上,土壤水分与气象要素之间的关系也不相同,这说明土壤水分的影响因素多而且复杂。由于受数据积累以及篇幅所限,本研究在这方面的研究还没有展开,结论

也具有很大的不确定性。后续将继续收集多年的土壤水分自动观测数据以及对应的气象、水文、土壤类型等数据,进一步探讨不同尺度下土壤水分与气象要素之间的耦合关系。

(3)基于土壤水分含量进行分区的研究报道很少,本研究尝试利用K聚类方法对土壤水分的月均值进行处理,得到的分区结果是否合理,值得进一步讨论。

2016年山东东部降水偏少,而且东部为山地、丘陵,农田少,灌溉也少,所以土壤水分含量较低;山东省西部以平原为主,农业发达,灌溉较好,土壤水分含量较高,本研究结果与上述实际情况相符。另外本研究的分区结果与山东省西部平原、中部鲁中山区、东部同东半岛丘陵的地形特点也较吻合。综上所述,4个区域的土壤水分含量及空间变化的差异性较明显,符合区划的自然分异原则,所以本研究的分区结果具有较高的合理性。

以上分析结果表明土壤水分自动观测数据弥补了人工观测间隔时间长、难以描述细节动态等方面的不足,具有较好的应用前景。但土壤水分自动观测业务工作开展的时间较短,因此本研究仅选取了2016年的数据进行时空分布规律及分区研究,尽管结果符合常规,但其精确性还需深入研究,其长时间尺度下的稳定性和可靠性还有待进一步检验。随着定位自动观测数据的逐年积累,其在不同时空尺度的土壤水分相关研究以及模型模拟方面都有较好的理论和应用价值^[29]。

参考文献:

- [1] 张晓虎,李新平. 几种常用土壤含水量测定方法的研究进展[J]. 陕西农业科学, 2008(6): 114-117.
- [2] BELL J E, PALECKI M A, BAKER C B, et al. U.S. Climate reference network soil moisture and temperature observations [J]. Journal of Hydrometeorology, 2013, 14: 977-988.
- [3] 韩姣姣,段旭,赵洋毅,等. 元谋干热河谷不同土地利用类型下土壤水分特征及其主控因[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(1): 168-173.
- [4] CAMMALLERI C, MICALÉ F, VOGT J. On the value of combining different modelled soil moisture products for European drought monitoring [J]. Journal of Hydrology, 2015, 525: 547-558.
- [5] 程立平,刘文兆. 黄土塬区土壤水分分布特征及其对不同土地利用方式的响应[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 203-207.
- [6] 王信增,焦峰,刘源鑫. 不同空间尺度土壤水分与环境因素的关系[J]. 生态学杂志, 2012, 31(2): 319-323.

- [7] 张强,王胜,曾剑. 论干旱区非降水性陆面液态水分含量及其与土壤水分的关系[J]. 干旱区研究, 2010, 27(3): 392-400.
- [8] 熊明明,陈海山,俞森. CLM3.0对中国区域陆面过程的模拟试验及评估Ⅱ:土壤湿度[J]. 气象科学, 2011, 31(1): 1-10.
- [9] 文莉娟,吕世华. 陆面数据同化方法在绿洲农田土壤温湿度模拟中的应用[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 60-65.
- [10] SCHALIE R, PARINUSSA R M, RENZULLO L G, et al. SMOS soil moisture retrievals using the land parameter retrieval model: evaluation over the Murrumbidgee Catchment, southeast Australia [J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 163: 70-79.
- [11] DRAPER S C, WAKLER J P, STEINLE P J, et al. An evaluation of AMSRE derived soil moisture over Australia [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2011, 4: 223-228.
- [12] MUELLER L, SCHINDLER U, MIRSCHEL W, et al. Assessing the productivity function of soils. A review [J]. Agronomy for Sustainable Development, 2010, 30(3): 601-604.
- [13] 范伶俐,郭品文,张羽,等. 2008年的湛江土壤湿度特征[J]. 热带气象学报, 2011, 27(1): 125-132.
- [14] 韩湘云,景元书,李根. 低丘红壤坡面土壤水分变化的气象因素冗余分析[J]. 生态学杂志, 2013, 32(9): 2368-2374.
- [15] KORNELSEN K C, COULIBALY PAULIN. Advances in soil moisture retrieval from synthetic aperture radar and hydrological applications [J]. Journal of Hydrology, 2013, 476: 460-489.
- [16] ALLAIRE S E, ROULIER S, CESSNA A J. Quantifying preferential flow in soils: a review of different techniques [J]. Journal of Hydrology, 2009, 378 (1/2): 179-204.
- [17] CARDENAS M B, KANAREK M R. Soil moisture variation and dynamics across a wildfire burn boundary in a loblolly pine (Pinus taeda) forest [J]. Journal of Hydrology, 2014, 519: 490-502.
- [18] SUR C Y, JUNG Y, CHOI M H. Temporal stability and variability of field scale soil moisture on mountainous hillslopes in Northeast Asia [J]. Geoderma, 2013, 207/208: 234-243.
- [19] HARDIE M, LISSON S, DOYLE R, et al. Determining the frequency, depth and velocity of preferential flow by high frequency soil moisture monitoring [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2013, 144: 66-77.
- [20] 胡春丽,李辑,王婉昭,等. 辽宁省春播期降水的时空特征及其对土壤水分的影响[J]. 灾害学, 2018, 33(1): 53-58.
- [21] SÖNMEZ I, KÖMÜŞCÜ A Ü. Reclassification of rainfall regions of Turkey by K-means methodology and their temporal variability in relation to North Atlantic Oscillation (NAO) [J]. Theor Appl Climatol, 2011, 106(3/4): 499-510.
- [22] 张秀芝,吴迅英,何金海. 中国土壤湿度的垂直变化特征[J]. 气象学报, 2004, 62(1): 51-61.
- [23] 韩晓阳,刘文兆,程立平. 黄土塬区深剖面土壤水分垂直分布特征及其时间稳定性[J]. 应用生态学报, 2017, 28(2): 430-438.
- [24] 徐志尧,张钦弟,杨磊. 半干旱黄土丘陵区土壤水分生长季动态分析[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(3): 145-151.
- [25] 方文松,陈怀亮,刘荣花,等. 河南雨养农业区土壤水分与气候变化的关系[J]. 中国农业气象, 2007, 28(3): 250-253.
- [26] CHO E, CHOI M. Regional scale spatio-temporal variability of soil moisture and its relationship with meteorological factors over the Korean peninsula [J]. J Hydrol, 2014, 516(17): 317-329.
- [27] 徐勇峰,郭俨辉,季淮,等. 洪泽湖湿地杨树林土壤水分变化及其与气象因子的关系[J]. 浙江农林大学学报, 2018, 35(1): 20-28.
- [28] 冯徽徽,刘元波. 2003-2009年鄱阳湖流域土壤水分时空变化特征及影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(2): 241-250.
- [29] 缪凌,董建国,汪有科,等. 黄土丘陵区不同土地利用类型下的深层土壤水分变化特征[J]. 水土保持研究, 2016, 23(2): 13-18.

(责任编辑:陈海霞)