doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.033

基于模糊 c 均值聚类法的玉米农田管理分区研究

陈世超　杜太生　王素芬
(中国农业大学中国农业水问题研究中心, 北京 100083)

摘要: 为提高大面积农田作物管理的精确性,以甘肃黄羊河农场玉米膜下滴灌示范区为研究对象,对大面积农田进行管理分区研究。综合考虑地形属性(高程、坡度、坡向)、土壤质地(砂粒、粘粒、粉粒含量)、土壤含水率(SWC)、速效氮含量(AN)、电导率($EC_{1:5}$)以及玉米产量,根据相关性分析结果筛选产量主控因子,使用主成分分析得到 3 个主成分作为分区依据,进而使用模糊 c 均值聚类法(Fuzzy c-means algorithm, FCM)进行管理区划分,以模糊性能指数和归一化分类熵作为最佳分区数的评判依据,分析管理分区后各分区间的差异。结果表明:玉米产量的主控因子分别为土壤粉粒含量、土壤砂粒含量、SWC、AN、$EC_{1:5}$和高程,使用模糊 c 均值聚类法进行聚类分区得到最优分区数为 3 个。管理区之间各主控因子呈现极显著差异性($P<0.01$),且生育期内作物株高、叶面积指数(LAI)和 SWC 在不同分区中也有明显差异;同时,分区内的各因子变异性均有不同程度的下降。研究结果说明,农田分区管理可以依据不同分区特点制定管理策略,为"精准农业"的实施提供理论基础。

关键词: 玉米; 精准农业; 空间分布; 主成分分析; 模糊 c 均值聚类法; 管理分区
中图分类号: S274.3　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2019)11-0293-08

Delineating Management Zones in Maize Field Based on Fuzzy C-means Algorithm

CHEN Shichao　DU Taisheng　WANG Sufen
(*Center for Agricultural Water Research in China*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Taking the demonstration area of drip irrigation under film as the research object, and aiming at delineating management zones in large areas of farmland, in Huangyanghe Farm, Gansu Province. The topographical attributes (elevation slope and aspect), soil texture (sand, clay and silt), soil moisture content, available nitrogen, electrical conductivity and yield of maize were considered, the degree of variation and correlation of each factor were analyzed, and then the master factors of maize yield were extracted by the results of correlation analysis. Three principal components were obtained by principal component analysis (PCA) based on the master factors. Fuzzy c-means clustering algorithm (FCM) was used to delineate management zones based on the spatial variation of the principal components, the optimal partition number was determined by the fuzzy performance index (FPI), and normalized classification entropy (NCE) were minimum at the same time, and then the differences of the master factors among the management zones were analyzed. Results showed that the master factors were silt, sand, soil water content, available nitrogen, electrical conductivity and elevation, and three management zones were determined by FCM. Statistically significant differences in the master factors were found among the three management zones. Soil water content, crop height and LAI were also significantly different in different management zones during the crop growth period. The spatial variation of the factors within the same management zones was smaller than that of the factors in the whole field, and the variation between zones was large. Delineation of management zones should be adopted based on the characteristics of each zone, and the research result provided a theoretical basis for the implementation of precision agriculture.

Key words: maize; precision agriculture; spatial distribution; principal component analysis; fuzzy c-means algorithm; management zones

收稿日期: 2019-04-08　修回日期: 2019-05-10
基金项目: 农业部公益性行业科研专项(201503125)和国家自然科学基金项目(51725904、51439006)
作者简介: 陈世超(1996—),男,博士生,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: chenshichaocsc@cau.edu.cn
通信作者: 杜太生(1975—),男,教授,博士,主要从事农业节水与水资源高效利用研究,E-mail: dutaisheng@cau.edu.cn

0 引言

“精准农业”概念从提出至今已逐渐成熟。同时大面积农田管理分区技术的应用也为农业生产过程中的精准调控提供了理论基础[1]。国内外众多学者基于农田土壤、作物的空间变异规律划分管理分区,进行分布式管理[2-4],根据土壤要素与作物的空间变异性,对农田进行管理区域划分,以达到“精准管理”的目的。应用该方法可以明确各分区之间的土壤、作物等要素的差异,因地制宜,可显著提高水肥利用效率和管理精度,减少资源浪费[1,3]。

大面积农田内土壤类型、养分以及地形属性都存在空间变异性,这些因素会影响产量,从而造成产量分布不均匀[2]。国内外学者对农田进行分区管理的研究大都集中于土壤养分聚类分析。张泽等[3]和温鹏飞等[4]对土壤养分指标和作物指标进行统计分析与相关分析,利用模糊 c 均值聚类法进行聚类,基于 GIS 和 RS 技术最终实现管理分区;陈彦等[5]和 BEHERA 等[6]使用 FCM 进行管理分区,将分区结果作为变量施肥和养分精确管理的作业单元;GUASTAFERRO 等[7]利用迭代自组织数据分析法(Iterative self-organizing data analysis)、FCM 和非参数密度算法(Non-parametric density algorithm)对研究区域进行管理区划分,3 种算法分区后子区域内各要素空间变异性减小,达到了分区后各因素均质化的目的,同样文献[8-10]使用模糊 c 均值聚类法得出了相似的结论;对于流域尺度的农田管理分区,周浩等[11]和杨建宇等[12]分别使用 FCM 和 TOPSIS 算法,划分了作物的适宜种植区和农田管理区。这些研究通过分析土壤养分含量以及金属阳离子交换量等多要素进行分区,阐述了分区后的均质性,但并未在时间尺度上考虑生育期内不同分区的土壤含水率变化和作物生长规律。同时,使用单一要素进行管理区划分的研究也有很多成果,表观电导率(EC_a)作为主要的评价指标可以反映多种土壤阳离子的含量,可以作为管理区划分的依据,其分区结果也较为合理[13-15],但单一要素反映产量空间变异性的信息少于多因素聚类分析法所得到的结果。

目前,农田分区后对不同区域土壤含水率(SWC)变化、作物生长规律以及产量的研究还鲜有报道,基于此,本文筛选对产量起决定作用的主控因子,基于主成分分析提取可反映各因子变异性的主成分,用模糊 c 均值聚类方法得到分区结果,分析分区后各因子的空间变异规律以及各分区的作物形态指标、土壤含水率在时间尺度上的差异,以期为农田分区管理提供科学依据和理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2016 年 4—10 月在甘肃省武威市凉州区黄羊河农场七队 2 号地(102°55′E,37°49′N)进行,研究区面积为 6.84 hm^2(120 m×570 m)。该区属典型的大陆性温带干旱荒漠气候,昼夜温差大,冬冷夏热、干燥、多风。全年日照时数 3 000 h 左右,无霜期 150 d 左右,年均气温 8.8℃,大于 0℃的年积温为3 550℃以上。多年平均降水量为 163.2 mm,多年平均水面蒸发量为 2 019.9 mm。灌溉水源为地下水,地下水埋深约 40 m。

研究区供试作物为制种玉米,于 2016 年 4 月 20 日种植,9 月 5 日收获。在研究区中划分 30 m×30 m 的均匀网格,另加设 15 个加密点,共 91 个取样观测点,用于取土测定土壤各项指标和作物产量,取样分布点如图 1 所示。灌溉施肥方式均采用膜下滴灌,使用“一膜两管四行”的铺设方式,滴灌带间距约 75 cm,株距 25 cm,植株与滴灌带的距离为 15 cm,滴头间距 30 cm,滴头流量 3.0 L/h,滴灌带长度约为 60 m。

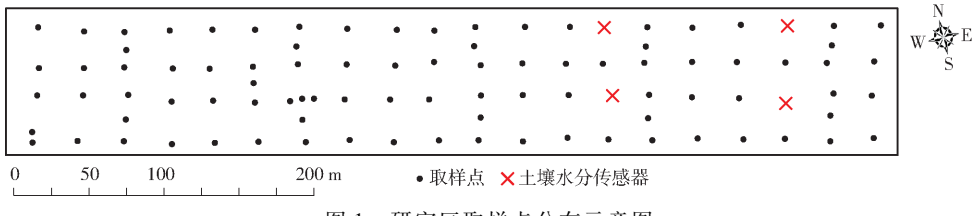


图 1 研究区取样点分布示意图

Fig. 1 Spatial distribution map of sampling points and elevation in study area

1.2 主要观测内容与方法

1.2.1 土壤质地

播种前,在各取样点取土,风干后过 2 mm 筛,使用 MaterSizer2000 型激光颗粒分析仪(Malvern Instruments Ltd.,英国)测定土壤砂粒、黏粒、粉粒含量[16],测量深度为 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm。

1.2.2 土壤含水率

播种前,在各取样点取土使用干燥法测定,测量深度为 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm;生育期内,使用土壤水分廓线仪(Diviner 2000 型,Sentek Pty

Ltd.，澳大利亚）测定，测量深度为 100 cm，每 20 cm 一层，并用取土干燥法进行校准，测定频率为 7 ~ 10 d，灌水前后和降雨后加测；同时安装土壤水分传感器（EC－5 型）进行连续监测，探头埋深分别为 20、40、60 cm（图 1）。

1.2.3　土壤速效氮含量

播种前，在各取样点取土，测定速效氮含量，测量深度为 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm，使用氯化钾浸提法（2 mol/L KCl 溶液）用 AutoAnalyzer－Ⅲ型流动分析仪（SEAL Analytical Gmbh，德国）测定[17-18]。

1.2.4　土壤电导率

播种前，在各取样点取土，测定土壤电导率，测量深度为 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm，采用 1∶5 的土水比法用 SevenCompact S230 型电导率仪（Mettler Toledo，美国）测定[19]。

1.2.5　作物生理指标和产量

玉米株高和叶面积指数（LAI）：在各取样点为中心划定 2 m × 2 m 矩形范围内选择 3 株玉米，于关键生育期（苗期、拔节期、抽穗期、灌浆期、成熟期）用米尺测定玉米株高，用 Sunscan 冠层分析仪测量玉米 LAI 并以手工测量法进行校正。

产量：作物成熟后在各取样点为中心划定 2 m × 2 m 的矩形范围内选择 10 株玉米，人工脱粒后在 85℃条件下干燥至恒定质量并称量，换算成单位面积产量作为该取样点所代表网格的产量。

1.2.6　取样点位置与地形属性

使用全球定位系统 GPS（Trimble Recon，美国）对取样点进行空间定位，取样点分布与高程图由 ARCGIS 10.2 生成，同时使用栅格数据计算、提取各取样点坡度、坡向数据。

1.3　主成分分析

影响作物产量的各因子之间存在相关性，使得各因子对产量的影响作用存在信息重叠。为了真实地反映各因子对产量的影响，需要将重复的因子进行压缩，达到“降维”的目的。主成分分析核心思想是降维，通过正交变换将一组可能存在相关性的变量转换为一组线性不相关的变量，转换后的这组变量即为主成分，主成分之间互相独立且包含原始变量中尽可能多的信息，依据各主成分贡献率判断其对因变量的影响程度[18]。

1.4　模糊聚类分析

在模糊聚类中，一个样本可以同时归属于不同的子集，其对不同子集归属程度通过隶属度来表示，隶属度越大，表示归属于某个子集的可能性就越大，反之则越小[20-22]。本文中，使用管理分区软件（Management zone analyst，MZA，version 1.0.1，美国）对测定的各因子进行聚类分析[17]。MZA 软件的核心是模糊 c 均值聚类算法，使用模糊性能指数（FPI）和归一化分类熵（NCE）作为评判聚类效果的评判标准，当 FPI 和 NCE 同时最小时的分区数即为最优[20,23]。

2　结果与分析

2.1　各因子统计与相关性分析

表 1、2 为各取样点的土壤质地和地形指标的描述性统计结果。结果表明，0 ~ 20 cm 的 SWC 随土壤深度增加而增加，这是由于休耕期的表面土壤水分蒸发导致的；速效氮（AN）含量和电导率（$EC_{1:5}$）在 0 ~ 40 cm 大于 40 ~ 60 cm，说明 AN 以及阴阳离子在上层土壤残留多。根据 WARRICK 等[24]对变异级别的分类，各因子均呈现中等变异性。SWC、

表 1　研究区土壤质地、土壤养分指标统计结果

Tab.1　Descriptive statistics results of soil properties and nutrient concentration of study area

土壤深度/cm	统计量	黏粒质量分数/%	粉粒质量分数/%	砂粒质量分数/%	土壤含水率/($cm^3 \cdot cm^{-3}$)	土壤速效氮质量比/($mg \cdot kg^{-1}$)	土壤电导率/($dS \cdot m^{-1}$)
0 ~ 20	最小值	2.14	28.65	9.63	0.09	14.53	0.11
	最大值	10.81	70.23	44.11	0.26	80.68	0.53
	平均值	8.82	60.53	29.52	0.14	60.27	0.27
	变异系数/%	30.21	17.03	34.14	20.12	63.88	39.44
20 ~ 40	最小值	3.66	30.65	10.77	0.12	13.65	0.13
	最大值	13.42	75.44	54.21	0.28	78.32	0.63
	平均值	12.02	62.53	27.93	0.17	59.18	0.27
	变异系数/%	24.68	26.69	33.28	19.82	57.86	33.89
40 ~ 60	最小值	5.41	34.55	15.36	0.16	8.52	0.11
	最大值	16.33	79.64	40.21	0.29	60.49	0.45
	平均值	13.97	59.53	27.38	0.19	43.19	0.22
	变异系数/%	23.26	18.13	30.28	17.65	52.86	32.66

表 2 研究区农田地形指标统计分析

Tab. 2 Descriptive statistics analysis of topography of study area

统计量	高程/m	坡度/%	坡向/(°)
最小值	1 576. 17	0. 03	2. 14
最大值	1 578. 40	1. 52	358. 32
平均值	1 577. 21	0. 77	154. 42
变异系数/%	0. 04	35. 65	82. 63

AN 和 $EC_{1:5}$ 的变异系数均随土壤深度的增加而减小,这是由于降雨等外界条件对深层土壤影响较小,受自身因素影响较大,从而变异性变小。

由表 3 可见,本研究区内,玉米产量与土壤粉粒含量、SWC 和 AN 均存在极显著正相关关系,与土壤砂粒含量和 $EC_{1:5}$ 均存在极显著负相关关系,与高程存在显著负相关关系。说明这些因素对玉米产量会产生较大影响,是玉米产量的主控因子,其结果与其他学者的研究相似[7,21]。各主控因子空间分布规律与产量分布相似,产量与土壤粉粒含量、SWC 和 AN 空间分布趋势一致,而与砂粒含量和 $EC_{1:5}$ 呈现相反的分布规律,这与相关性分析结果一致(图 2)。

表 3 研究区地形指标、土壤质地指标、土壤含水率、速效氮含量、电导率和产量的相关性系数

Tab. 3 Correlation analysis between topography, soil properties, SWC, AN, $EC_{1:5}$ and maize yield in study area

	产量	高程	坡度	坡向	粘粒含量	粉粒含量	砂粒含量	土壤电导率	土壤含水率	土壤速效氮含量
产量	1									
高程	-0. 29 *	1								
坡度	-0. 07	0. 05	1							
坡向	0. 21	-0. 07	0. 09	1						
粘粒含量	0. 20	0. 22 *	-0. 03	-0. 18	1					
粉粒含量	0. 79 **	-0. 23 *	-0. 09	0. 02	0. 23 *	1				
砂粒含量	-0. 72 **	0. 13	0. 08	0. 03	-0. 48 **	-0. 96 **	1			
土壤电导率	-0. 39 **	0. 04	0. 10	-0. 10	0. 06	-0. 23 *	0. 19 *	1		
土壤含水率	0. 46 **	-0. 25 **	-0. 13	-0. 06	0. 028 **	0. 52 **	-0. 54 **	-0. 15	1	
土壤速效氮含量	0. 50 **	-0. 09	0. 03	0. 08	0. 01	-0. 04	0. 03	0. 47 **	0. 20 *	1

注:* 和 ** 分别表示显著性($P<0.05$)和极显著性($P<0.01$)水平。

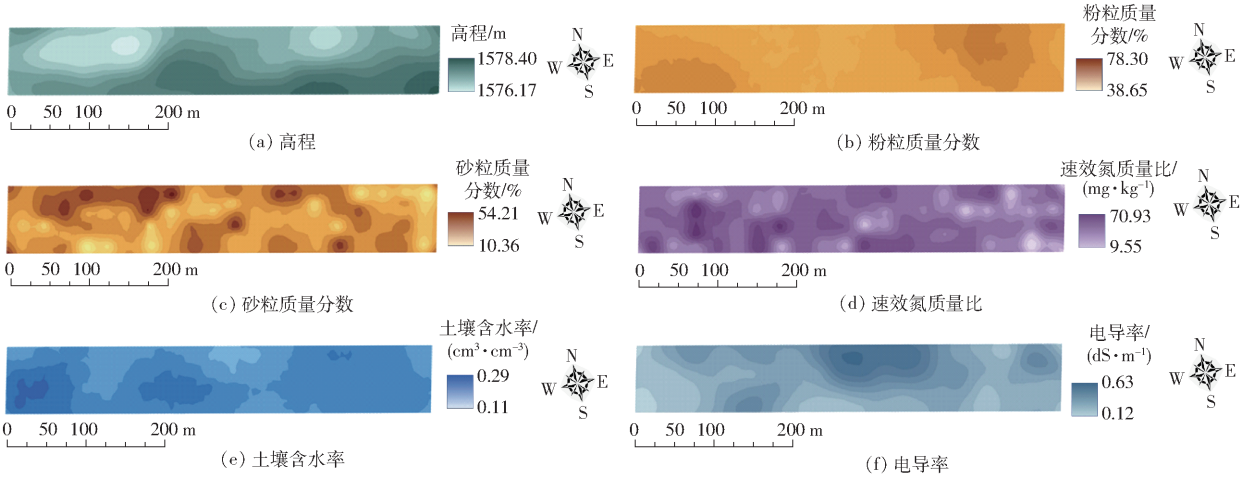


图 2 研究区高程、土壤粉粒、砂粒含量、土壤速效氮含量、土壤含水率和电导率的空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution maps of elevation, silt, sand, AN, SWC, and $EC_{1:5}$ in study area

2.2 主成分分析

由相关性分析结果可以得出,土壤粉粒含量、砂粒含量、SWC、AN、$EC_{1:5}$ 和高程为产量的主控因子,对其标准化后进行主成分分析。由分析结果可以看出,第 3 主成分(PC3)特征值接近 1,且前 3 个主成分累积贡献率为 88. 62%(>85%),故选取前 3 个主成分(PC1、PC2 和 PC3)作为主成分,可以反映各因子空间变异性 88. 62% 的原始信息(表 4)。土壤粉粒含量和 SWC 对 PC1 的荷载分别为 0. 91 和 0. 67,砂粒含量的荷载为 -0. 88;$EC_{1:5}$ 对 PC2 的荷载为 0. 75,而对 PC1 的荷载为 -0. 59;高程对 PC3 的荷载为 0. 65(表 5)。对比主成分得分和产量的空间分布图(图 3)可以看出,PC1 得分分布与产量较为一致,在产量高的区域其得分也越高;PC2 得分分布与产量的空间分布相反;PC3 得分空间分布与高程较为一致。这与主成分中荷载大的因子分布相

关：在 PC1 中，粉粒含量和 SWC 的正荷载占据主导地位，而在 PC2 中 $EC_{1:5}$ 荷载大于其他因子，这与相关性分析结果一致。结果说明，PC1 主要反映土壤质地与养分的信息，PC2 则主要反映 $EC_{1:5}$（盐碱度）的信息，PC3 则主要反映研究区高程的信息。

表 4　主成分特征值和贡献率

Tab. 4　Characteristic values and contribution rate of principal components

主成分	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
PC1	2.88	47.95	47.95
PC2	1.05	27.47	75.42
PC3	0.91	13.20	88.62
PC4	0.72	8.02	96.64
PC5	0.41	2.90	99.53
PC6	0.03	0.47	100

表 5　研究区主成分因子载荷

Tab. 5　Factor loadings of principle components in study area

因子	高程	粉粒含量	砂粒含量	土壤含水率	速效氮质量比	电导率
PC1	−0.36	0.91	−0.88	0.67	0.55	−0.59
PC2	−0.11	−0.46	0.09	−0.45	−0.20	0.75
PC3	0.65	−0.10	−0.10	−0.16	−0.08	0.09

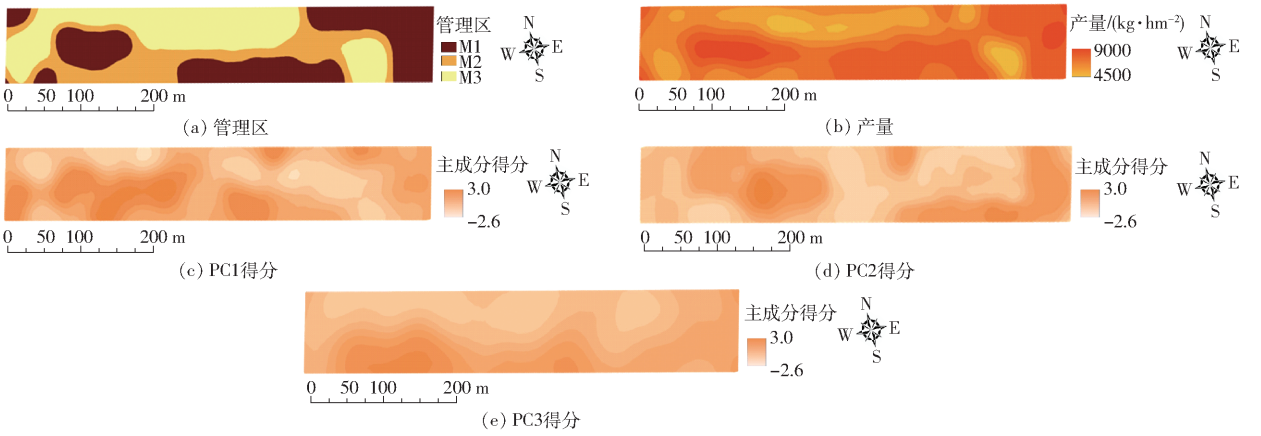


图 3　研究区玉米产量、管理区和主成分得分空间分布图

Fig. 3　Spatial distribution maps of maize yield, management zones and principal components values in study area

2.3　基于模糊聚类的管理区划分

将前 3 个主成分作为模糊 c 均值聚类分析的输入变量[23]。依据模糊效果指数（FPI）和归一化分类熵（NCE）同时最小即为最优的原则确定最优分区数[13,25]。由图 4 可以看出，当分区数为 3 时满足 FPI 和 NCE 均为最小值，故将本研究区域分为 3 个管理区，分别命名为 M1、M2 和 M3。

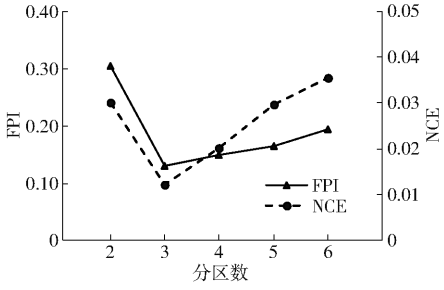


图 4　不同分区数时的模糊效果指数（FPI）和归一化分类熵（NCE）

Fig. 4　Calculated fuzziness performance index (FPI) and normalized classification entropy (NCE) in study area

由分区图（图 3）可见，分区情况与实测产量的分布有很大的相似性。对 3 个管理区各因子与产量进行方差分析，结果显示不同管理区间除高程外其他因子的差异均达极显著水平（$P < 0.01$）（表 6）。对各分区内产量的主要影响因子进行统计分析（表 6）发现，M1 管理区内土壤粉粒含量、SWC 和 AN 在 3 个分区中最高，砂粒含量和 $EC_{1:5}$ 最低，是玉米生长较为适宜的土壤环境，其产量为 7 244 kg/hm^2；反之，M3 管理区内 SWC 和 AN 含量低，砂粒含量和 $EC_{1:5}$ 高于其他两个分区，土壤环境对玉米生长有不利影响，其产量为 5 502 kg/hm^2；M2 管理区各因子均值处于 M1 和 M3 之间。这与相关性分析和主成分分析的结果一致。同时，大部分因子的变异系数较分区前下降 0.01% ~ 38.10%，说明在分区内各因子的分布趋于均质化（表 6），达到了农田管理分区的目的。

2.4　生育期内不同分区土壤含水率与作物生长指标对比分析

根据分区结果，对不同分区内的土壤含水率和玉米株高、LAI 进行时间尺度上的对比分析，可以看出在各因子之间差异最大的位于 M1 和 M3 区域内，SWC 变化以及植株形态指标差异显著；同时 3 个管理区内株高与 LAI 由大到小顺序均为 M1、M2、M3（图 5a）。在拔节期之前，玉米株高和叶面积指数在 3 个管理区中差异不大，但在拔节开始后产生明显差异。造成作物形态指标存在明显差异的原因是土

表 6 研究区内不同分区主控因子均值、变异系数统计与方差分析

Tab. 6 Mean value, coefficient of variation and variance analysis of master factors for different management zones in study area

管理分区	样点数量	统计量	高程/m	粉粒质量分数/%	砂粒质量分数/%	土壤含水率/($cm^3 \cdot cm^{-3}$)	土壤速效氮质量比/($mg \cdot kg^{-1}$)	土壤电导率/($dS \cdot m^{-1}$)	产量/($kg \cdot hm^{-2}$)
研究区	91	平均值	1 577.21	59.53	27.65	0.16	57.63	0.26	6 602.00
		变异系数%	0.04	18.21	33.28	19.94	63.87	37.93	19.07
M1	31	平均值	1 576.91	61.77	18.35	0.18	66.92	0.16	7 244.00
		变异系数%	0.05	13.67	24.56	13.09	31.26	13.87	16.27
M2	36	平均值	1 577.15	56.21	27.48	0.15	50.87	0.20	6 826.00
		变异系数%	0.03	17.31	21.37	17.39	25.77	20.26	17.77
M3	24	平均值	1 577.25	53.95	41.99	0.13	27.99	0.34	5 502.00
		变异系数%	0.03	20.71	22.40	18.44	30.38	27.34	9.24
方差分析	91	F	2.84	5.29	6.01	9.39	7.16	24.39	21.67
		$P > F$	0.06	0.01	0	0	0	0	0

壤各组分存在变异性,且 3 个管理区内土壤含水率差异明显:在 M1 管理区内土壤持水能力强,土壤水分向深层移动速度缓慢,在下一次灌水前可为作物持续提供水分,植株可持续利用的水量多,利于作物吸收水分和养分;在 M3 管理区内土壤砂粒含量高使土壤透水性强,土壤水分向深层移动速度快,造成作物主要根系层没有充足的水分与养分供给,从而出现水分和养分胁迫影响作物正常生长;M2 管理区的土壤水分的变化趋势在 M1 和 M3 之间(图 5b)。

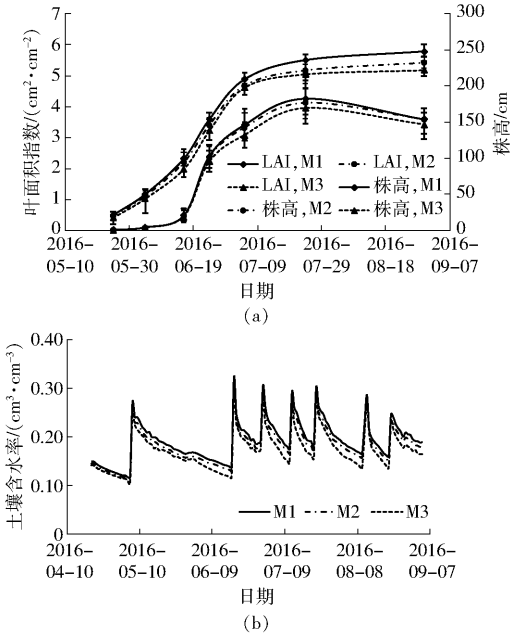


图 5 M1、M2 和 M3 管理区内玉米株高、叶面积指数和土壤含水率变化对比曲线

Fig. 5 Changing curves of leaf area index (LAI), crop height and SWC in M1, M2 and M3 zones during growth period

3 讨论

农田管理分区是实现精准农业的重要环节,是农田分区和分布式管理的基础。大面积农田内土壤属性、地形属性的空间变异性,导致了作物生长和产量也有较强的空间变异特征[25-27]。李翔等[28]验证了多种传统分区方法的实际分区效果,发现利用空间连续性聚类算法(SCKM)所得分区结果的聚集度和破碎度均为最优,有利于田间实际操作;土壤质地对作物有着很大影响,土壤质地的差异以及各层土壤组分的不同对土壤水分的分布产生较大影响,同时土壤养分与地形因素也是不可忽略的因素[29-30];土壤质地的差异对土壤水分、养分运移与分布的影响也造成了不同分区内作物产量的差异[31-32]。本研究中,高程作为玉米产量的主控因子,其影响比其他主控因子小,且在前两个主成分中荷载明显小于其他因子,与其他学者的研究不尽相同[33-36],这主要是因为本研究区域内地势平坦,高程的空间变异性弱,导致高程、坡度和坡向在本研究中对产量的影响不显著。

对于大面积农田,在灌水、施肥等管理措施均一致的情况下,由于土壤质地的空间变异性造成土壤持水性和土壤入渗性能的空间变异,对土壤水分、养分的运移产生影响最终导致产量存在极大差异[37-38]。因此对本研究中得到的 3 个管理分区,可以采用不同的方式进行管理。对于 M3 区域,其土壤质地砂粒含量高,土壤持水能力弱,因此需要在生育期内提高灌水频率,以保证作物不受水分胁迫;同时土壤速效氮含量较低、电导率较高,因此在种植前应进行滴灌压盐,并在生育期内增施氮肥。M1 区域土壤质地主要为壤土或粉质壤土,持水性能良好,因此可减少生育期内灌溉次数以节省劳动成本,且土壤速效氮含量较高可适当减少施氮量。M2 区域内各项指标均处于 M1 和 M3 之间,在管理过程中可减少生育期内灌溉次数同时适量施肥以满足作物需求量。工程方面,3 个分区面积均为 1.8 ~ 2.7 hm^2,便

于集中分区管理和田间机械化作业，因此在进行滴灌工程设计时，可以对不同分区进行变径设计，以实现灌溉的精确管理，从而为分区制定不同的水肥一体化制度提供理论依据和方法支撑。同时磷、钾等主要营养元素对作物生长有关键作用，因此在进一步的研究中，应对各管理区内土壤磷和钾等元素在生育期内的变化进行分析，以得到更为科学的管理建议。

4　结论

（1）研究区域内土壤粉粒含量和高程均呈现弱变异性，土壤粘粒、砂粒含量呈现中等变异性，SWC、AN 和 $EC_{1:5}$ 呈现中等变异性；玉米产量与土壤粉粒含量、SWC 和 AN 存在显著正相关关系，与土壤砂粒含量、高程和 $EC_{1:5}$ 存在显著负相关关系；通过主成分分析可知，土壤粉粒含量、SWC 对产量空间变异有主要的正贡献，砂粒含量和 $EC_{1:5}$ 对产量有主要负贡献。

（2）根据 3 个主控成分得分的空间分布规律，利用模糊 c 均值聚类的方法，将农田分为 3 个管理区，管理区之间各因子有很大差异，管理区内大部分因子呈弱变异性；不同管理区内作物生长和产量有明显差异，主要是由于土壤质地的空间变异性使 SWC 变异性增强，造成了生长与产量的较大差异。

（3）可以根据分区结果指导农业的精准管理，为规模化农田滴灌工程的设计提供科学指导；同时依据分区内不同的的土壤属性与养分，制定不同的灌水施肥制度，以提高大面积农田管理的针对性。

参　考　文　献

[1] 金继运. “精准农业”及其在我国的应用前景[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(1):1 - 7.
JIN Jiyun. Precision agriculture and its perspective in China [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 1998, 4(1):1 - 7. (in Chinese)

[2] CRUZ-CÁRDENAS G, SILVA J T, OCHOA-ESTRADA S, et al. Delineation of environmental units by multivariate techniques in the duero river watershed, Michoacán, Mexico[J]. Environmental Modeling & Assessment, 2016, 22(3):1 - 10.

[3] 张泽, 吕新, 吕宁,等. 基于 GIS、RS 的滴灌棉田土壤养分精确管理分区研究[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(7):125 - 132.
ZHANG Ze, LÜ Xin, LÜ Ning, et al. Defining agricultural management zones using remote sensing and GIS techniques for drip-irrigated cotton fields[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7):125 - 132. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20140720&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.07.020. (in Chinese)

[4] 温鹏飞, 吕新, 张泽,等. 滴灌棉田水氮精细管理决策系统设计与实现[J]. 农机化研究, 2015,37(10):205 - 210.
WEN Pengfei, LÜ Xin, ZHANG Ze, et al. Design and implementation of drip irrigation cotton fine water and nitrogen management decision-making system [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(10):205 - 210. (in Chinese)

[5] 陈彦, 吕新. 基于 FCM 的绿洲农田养分管理分区研究[J]. 中国农业科学, 2008, 41(7):2016 - 2024.
CHEN Yan, LÜ Xin. Definition of management zones of soil nutrients based on FCM algorithm in oasis field[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(7):2016 - 2024. (in Chinese)

[6] BEHERA S K, MATHUR R K, SHUKLA A K, et al. Spatial variability of soil properties and delineation of soil management zones of oil palm plantations grown in a hot and humid tropical region of southern India[J]. CATENA, 2018, 165:251 - 259.

[7] GUASTAFERRO F, CASTRIGNANÓ A, BENEDETTO D D, et al. A comparison of different algorithms for the delineation of management zones[J]. Precision Agriculture, 2010, 11(6):600 - 620.

[8] LI Y, SHI Z, LI F, et al. Delineation of site-specific management zones using fuzzy clustering analysis in a coastal saline land [J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2007, 56(2):174 - 186.

[9] 唐春闺,李强,李帆,等. 基于 GIS 和 FCM 的宁乡植烟土壤养分管理分区[J]. 湖北农业科学, 2017,56(6): 1029 - 1032.
TANG Chungui, LI Qiang, LI Fan, et al. Definition of management zones of tobacco soil nutrients based on GIS and FCM in Ningxiang[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2017,56(6): 1029 - 1032. (in Chinese)

[10] OSHUNSANYA S O, OLUWASEMIRE K O, TAIWO O J. Use of GIS to delineate site-specific management zone for precision agriculture[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2017, 48(5):565 - 575.

[11] 周浩, 雷国平, 杨雪昕,等. 基于 AgentLA 模型的农田精准灌溉管理分区研究[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 274 - 279.
ZHOU Hao, LEI Guoping, YANG Xuexin, et al. Study on precision irrigation management zones in farmland according agent-based model for optimal land allocation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(1): 274 - 279. (in Chinese)

[12] 杨建宇, 徐凡, 刘光成,等. 基于 TOPSIS 算法的永久基本农田划定方法[J/OL]. 农业机械学报, 2017,48(8):133 - 139.
YANG Jianyu, XU Fan, LIU Guangcheng, et al. Demarcation method of permanent prime cultivated land based on TOPSIS[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(8):133 - 139. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20170814&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.

2017.08.014. (in Chinese)
[13] PERALTA N R, COSTA J L. Delineation of management zones with soil apparent electrical conductivity to improve nutrient management[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2013, 99(7):218 - 226.
[14] MORAL F J, TERRÓN J M, SILVA J R M D. Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques[J]. Soil & Tillage Research, 2010, 106(2):335 - 343.
[15] COSTA J L. Delineation of management zones with measurements of soil apparent electrical conductivity in the southeastern pampas[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2013, 93(2):205 - 218.
[16] RYŻAK M, BIEGANOWSKI A. Methodological aspects of determining soil particle-size distribution using the laser diffraction method[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2011, 174(4):624 - 633.
[17] KAMPHAKE L J, HANNAH S A, COHEN J M. Automated analysis for nitrate by hydrazine reduction[J]. Water Research, 1967, 1(3):205 - 216.
[18] BARONI G, ORTUANI B, FACCHI A, et al. The role of vegetation and soil properties on the spatio-temporal variability of the surface soil moisture in a maize-cropped field[J]. Journal of Hydrology, 2013, 489(3):148 - 159.
[19] SLAVICH P G, PETTERSON G H, SLAVICH P G, et al. Estimating the electrical conductivity of saturated paste extracts from 1∶5 soil, water suspensions and texture[J]. Australian Journal of Soil Research, 1993, 31(1):73 - 81.
[20] BEZDEK J C, KELLER J M, KRISHNAPURAM R, et al. Fuzzy models and algorithms for pattern recognition and image processing[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999.
[21] HOPPNER F, KLAWONN F, KRUSE R, et al. Fuzzy cluster analysis[M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 1999.
[22] ALBORNOZ E M, KEMERER A C, GALARZA R, et al. Development and evaluation of an automatic software for management zone delineation[J]. Precision Agriculture, 2017,19(2 - 3):1 - 14.
[23] FRIDGEN J J, KITCHEN N R, SUDDUTH K A, et al. Management zone analyst (MZA): software for subfield management zone delineation[J]. Agronomy Journal, 2004, 96(1): 100 - 108.
[24] WARRICK A W, NIELSEN D R. Spatial variability of soil physical properties in the field[M]// DANIEL H. Applications of soil physics. Pittsburgh: Academic Press, 1980:319 - 344.
[25] ODEH I O A, CHITTLEBOROUGH D J, MCBRATNEY A B. Soil pattern recognition with fuzzy-c-means: application to classification and soil-landform interrelationships[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(2):505 - 516.
[26] SHI Zhou, HUANG Mingxiang, LI Yan. Physico-chemical properties and laboratory hyperspectral reflectance of coastal saline soil in Shangyu City of Zhejiang Province, China[J]. Pedosphere, 2003,13(3): 193 - 198.
[27] ZHU Qing, SCHMIDT J P, BRYANT R B. Maize (*Zea mays*, L.) yield response to nitrogen as influenced by spatio-temporal variations of soil-water-topography dynamics[J]. Soil & Tillage Research, 2015, 146(3):174 - 183.
[28] 李翔, 潘瑜春, 赵春江,等. 基于空间连续性聚类算法的精准农业管理分区研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8):78 - 82.
LI Xiang, PAN Yuchun, ZHAO Chunjiang, et al. Delineating precision agriculture management zones based on spatial contiguous clustering algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(8):78 - 82. (in Chinese)
[29] 李雪转, 樊贵盛, 王雪. 影响土壤入渗积水时间因素的试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9):27 - 31.
LI Xuezhuan, FAN Guisheng, WANG Xue. Experiments on factors affecting ponding time under soil infiltration conditions [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(9):27 - 31. (in Chinese)
[30] 李久生, 杨风艳, 栗岩峰. 层状土壤质地对地下滴灌水氮分布的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7):25 - 31.
LI Jiusheng, YANG Fengyan, LI Yanfeng. Water and nitrogen distribution under subsurface drip fertigation as affected by layered-textural soils[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7):25 - 31. (in Chinese)
[31] 吴元芝, 黄明斌. 土壤质地对玉米不同生理指标水分有效性的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2):82 - 88.
WU Yuanzhi, HUANG Mingbin. Effect of soil texture on soil water availability for different maize hysiological indices[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(2): 82 - 88. (in Chinese)
[32] ORTEGA R A, SANTIBANEZ O A. Determination of management zones in corn (*Zea mays* L.) based on soil fertility[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2007, 58(1):49 - 59.
[33] SILVA J R M D, ALEXANDRE C. Spatial variability of irrigated corn yield in relation to field topography and soil chemical characteristics[J]. Precision Agriculture, 2005, 6(5):453 - 466.
[34] JR M D S, SILVA L L. Evaluation of the relationship between maize yield spatial and temporal variability and different topographic attributes [J]. Biosystems Engineering, 2008, 101(2):183 - 190.
[35] MACHADO S, EDJR B, ARCHER T L, et al. Spatial and temporal variability of sorghum grain yield: influence of soil, water, pests, and diseases relationships [J]. Precision Agriculture, 2002, 3(4):389 - 406.
[36] TIMLIN D J, PACHEPSKY Y, SNYDER V A, et al. Spatial and temporal variability of corn grain yield on a hillslope[J]. Soil Science Society of America Journal, 2012, 62(3):764 - 773.
[37] WAKINDIKI I I C. Soil mineralogy and texture effects on crust micromorphology, infiltration, and erosion[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(3):897 - 905.
[38] MAMEDOV A I, LEVY G J, SHAINBERG I, et al. Wetting rate, sodicity, and soil texture effects on infiltration rate and runoff[J]. Soil Research, 2001, 39(6):1293 - 1305.