

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.11.011

盐渍化平原区玉米产量空间变异与地形关系研究*

张晓光 黄 标 张贝尔 赵永存 孙维侠 胡文友

(中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室, 南京 210008)

【摘要】 选择华北平原中存在盐渍化的禹城市作为典型研究区,在获取全市范围玉米测产、地形数据信息的基础上,利用空间插值技术研究了地形因子对玉米产量的影响。研究发现,禹城市玉米产量沿东北到西南方向逐渐递增,与地形起伏一致。地形起伏虽然较小,但玉米产量仍随着海拔高度的增加而增加,呈极显著正相关($R = 0.263, p < 0.01$)。平面曲率与玉米产量呈显著负相关($R = -0.245, p < 0.05$),即田块的平面曲率越大,越易积聚盐分,导致玉米产量越低。地形因子对禹城市玉米产量空间变异起到12.4%的影响作用。

关键词: 盐渍化土地 玉米产量 地形 空间变异

中图分类号: F319.9; S315 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)11-0051-07

Spatial Variability of Maize Yield and Relations to Terrain Attributes in Salinized Plain Region

Zhang Xiaoguang Huang Biao Zhang Beier Zhao Yongcun Sun Weixia Hu Wenyou

(Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract

Using Yucheng county with soil salinization as a typical area of the north China plain, spatial variability of maize yields was described and influence of the terrain attributes on maize yields were discussed by space interpolation techniques based on measuring maize yields in field and extracting terrain information. The results showed that maize yields gradually increased along the northeast to southwest of the county with increasing the elevation. Although terrain undulated very slightly, the increasing trend of the elevation was agreement with the distribution of yields from low to high. A very significantly positive correlation ($R = 0.263, p < 0.01$) existed between maize yields and elevation. Meanwhile, a significantly negative correlation ($R = -0.245, p < 0.05$) existed between maize yields and plane curvature, indicating that the bigger plane curvature, the easier saline accumulation leading to decreased maize yields. The combined effects of elevation and plane curvature explained 12.4% of the observed variability of maize yields.

Key words Salinized land, Maize yield, Terrain, Spatial variability

引言

农业生产中作物产量空间变异性的产生原因分析是当今农业领域的一个热点研究问题^[1],对于确定合理的田间管理方式、有效利用资源、提高作物的

产量都具有重要的指导意义。

作物产量受众多因素共同影响,如地形因子、土地景观位置、侵蚀状况、土壤属性等长期持续性因素^[2-3]和气候灾害、病虫害等短暂影响因素^[3]。其中地形是影响作物产量的一个重要因素^[4],它通过

收稿日期: 2011-11-28 修回日期: 2012-02-15

* 公益性行业(农业)科研专项经费资助项目(200903001-01)和中国科学院知识创新工程重大项目(KSCX1-YW-09-02)

作者简介: 张晓光,博士生,主要从事农业资源和地理信息系统及遥感应用研究, E-mail: zhangxg_66@sina.com

通讯作者: 黄标,研究员,博士生导师,主要从事土壤资源及其评价研究, E-mail: bhuang@issas.ac.cn

影响水热分布状况^[2,5]和重新分配土壤养分组合,直接或间接影响作物生产力^[6-13]。

目前研究资料表明,关于地形对作物产量影响的研究大多在非盐渍化地区进行,主要集中在两方面:一是选取具有典型地形地貌特征且变化较大的典型地块,进行作物产量和地形关系研究^[1,4];二是小面积的田块或农场尺度进行作物产量和地形关系研究^[2-3,7-8,14-15]。而在具有盐碱化现象的平原地区,较大尺度地开展类似研究则很少见。与非盐渍化地区不同,盐渍化平原地区微地形对地下水以及盐分含量影响很大,可以直接影响到作物生长发育。而小尺度的田块试验结果推及至较大空间尺度与实际情况是否一致尚需要推敲。因此,开展较大尺度盐渍化平原地区地形与作物产量的关系研究很有必要。

本文以黄淮海平原区典型的粮食生产基地禹城市为研究区,研究盐渍化平原地区县域范围内作物产量及地形数据的空间变异;并研究该区地形因素与作物产量关系,以期揭示黄淮海平原区典型粮食生产区地形对玉米产量的影响。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区设置在山东省禹城市(图1)。该市处于黄淮海平原腹地,地理位置在东经 $116^{\circ}22'11'' \sim 116^{\circ}45'00''$,北纬 $36^{\circ}41'36'' \sim 37^{\circ}12'13''$ 。总面积 990.7 km^2 ,其中耕地面积为 $52\,927 \text{ hm}^2$ 。主要种植作物为玉米、小麦、棉花等。种植方式为一年两熟(小麦-玉米)轮作制。

该市属于暖温带半湿润季风气候区,多年平均气温 13.1°C ,年均降水量 582 mm ,太阳辐射总量 $5\,225 \text{ MJ/m}^2$,日照时数 $2\,640 \text{ h}$, 0°C 以上积温为 $4\,951^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$, 10°C 以上积温为 $4\,441^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$,无霜期 200 d 。光热资源丰富,雨热同期,利于农业生产。在地形上,该市自西南向东北缓缓倾斜,海拔高度最高处 28.43 m ,最低处 17.51 m ,降比为 $1/8\,000 \sim 1/10\,000$,属典型的冲积平原。土壤类型以锥形土为主,有少量盐成土(图1)。

1.2 玉米和土壤样品采集与分析

为了解禹城市玉米在不同地形条件下的产量状况以及在空间上的分布情况,2008年秋天在禹城市进行了玉米测产。测产田块的选择按照土壤类型、作物产量高低、地形特征等因素确定,共确定测产田块 100 个,涵盖了从低到高所有的海拔高度,平均每 9.9 km^2 一个测产田块,田块间平均间距 $3\,146 \text{ m}$ 。每个测产田块分别取 3 个样方,每个样方的宽度为

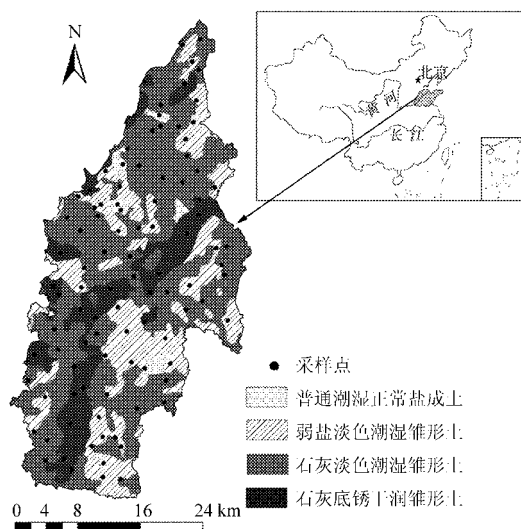


图1 禹城市位置、土壤类型及其测产点分布

Fig. 1 Location of Yucheng county and distribution of soils and sampling sites

两行中心距离(d),长度大于 $d/3$,3个样方面积相加约 10 m^2 以上。采集样方内所有的玉米穗,装袋后带回晒干、剥下玉米籽粒,并对每个样方玉米籽粒称量,然后转换为以 hm^2 为单位的玉米产量。当年年均降水为 608 mm ,年均温 13.7°C ,基本与多年平均水平一致,故可以代表禹城市产量状况。

根据农户调查,采样点玉米生育期内采用大畦灌水。灌水量为播种后 $450 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 、拔节-抽穗期 $600 \sim 750 \text{ m}^3/\text{hm}^2$;施肥量为出苗期 $75 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 、大喇叭口期 $525 \text{ kg}/\text{hm}^2$ (以尿素为标准),各农户大致处于类似水肥管理水平。玉米品种主要为浚单20和郑单958,均属高产、稳产品种。

在采集玉米样品的同时采集测产田块 $5 \sim 6$ 处 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 深处土壤混合样品,带回实验室进行土壤理化性质测定。粘粒含量用吸管法测定,阳离子交换量测定用乙酸铵法,电导率测定用电导法,pH值测定用电位法,有机质含量测定用低温外加热重铬酸钾氧化-滴定法,全氮含量测定用半微量凯氏法,全磷含量测定用氢氟酸-高氯酸-硝酸消煮-钼锑抗比色法,全钾含量测定用氢氟酸-高氯酸-硝酸消煮法,有效磷含量测定用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法,速效钾测定用乙酸铵浸提-火焰光度法^[16-17]。

用GS+软件拟合玉米产量空间分布的半方差函数,用Arcgis 9.2软件地统计模块进行产量普通克里格插值计算,并作出禹城市玉米产量的空间分布图。

1.3 地形数据处理

获取禹城市的ASTERGDEM地形数据,数据来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据服务平台,投影系统为UTM/WGS84,30 m分辨率。

本文利用 Arcgis 9.2 地形分析模块,将 DEM 数据转换计算出全市相应的坡度、坡向、曲率、平面曲率和剖面曲率等信息,然后用 Extract 功能提取各个采样点的地形信息^[18]。

利用 SPSS 13.0 对地形、作物产量和土壤性质等信息作 Person 相关性分析^[19~20]、逐步回归分析和主成分分析,研究三者之间的相关性,探讨地形因子对土壤属性及玉米产量的影响。

2 结果与分析

2.1 玉米产量及土壤属性统计特征及空间分布

由表 1 可知,全市玉米平均产量为 7.76 t/hm²,最大产量为 10.5 t/hm²,最小产量为 4.29 t/hm²,变异系数达 18%。玉米产量存在明显变异,最高产量是最低产量 2 倍多。

表 1 禹城市玉米产量及土壤属性统计特征
Tab.1 Descriptive statistics of maize yields and soil attributes in Yucheng county

参数	最小值	最大值	平均值	标准差
玉米产量/t·hm ⁻²	4.29	10.50	7.76	1.40
粘粒质量分数/%	3.23	20.60	8.98	2.90
pH 值	8.03	9.14	8.56	0.22
电导率/dS·m ⁻¹	58.70	690.00	113.20	54.62
阳离子交换量/mmol·kg ⁻¹	54.62	262.47	119.86	31.71
有机质质量比/g·kg ⁻¹	2.33	31.07	15.78	6.16
全氮质量比/g·kg ⁻¹	0.40	2.73	1.17	0.50
全磷质量比/g·kg ⁻¹	0.20	3.14	1.51	0.48
全钾质量比/g·kg ⁻¹	13.14	20.29	16.23	2.28
速效磷质量比/g·kg ⁻¹	6.55	32.23	12.12	4.60
速效钾质量比/g·kg ⁻¹	43.18	285.75	87.92	37.99

土壤属性中,电导率的变异系数较大,达到了 66%。土壤全钾质量比和 pH 值变异系数很小。其他土壤属性变异系数基本在 30%~40% 左右。

半方差函数计算结果表明,禹城市玉米产量数据符合球状模型, R^2 为 0.732。 $C_0/(C_0+C)$ 等于 0.33,其中, C_0 表示块金值, C_0+C 表示基台值。说明玉米含量有中度的空间相关性(图 2)。变程为 3 680 m,所以玉米合理采样间距不应超过 3 860 m。文中测产田块的平均间距为 3 146 m,小于变程,表明本研究采取的玉米采样点设置符合研究的要求。经克里格插值获得禹城市玉米产量空间分布(图 3)。

从禹城市玉米产量空间预测分布图可看出,较高产量的区域出现在西南部,自西南向东北方向,产

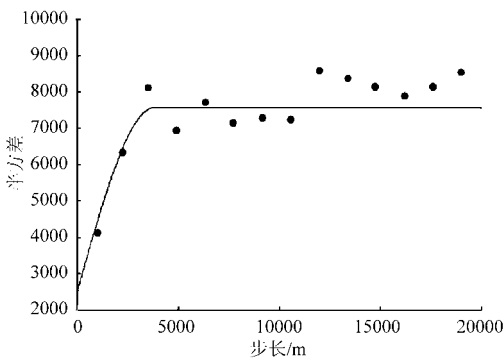


图 2 禹城市玉米产量的半方差函数及拟合参数
Fig.2 Semivariance and matching parameters of maize yields in Yucheng county

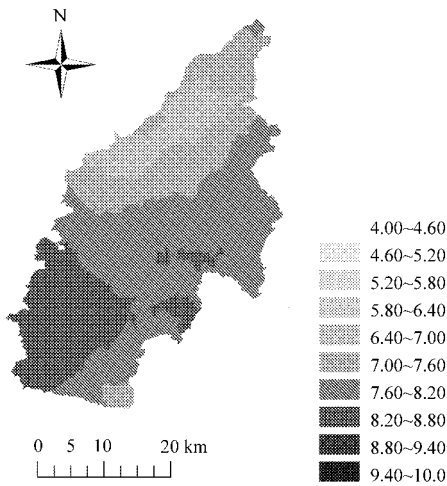


图 3 禹城市玉米产量空间分布
Fig.3 Spatial distribution of maize yields in Yucheng county

量逐渐降低,较低产量区域出现在北部地区。

2.2 禹城市地形属性统计特征

结合禹城市测产田块地形属性的描述性统计(表 2)及其空间分布图(图 4)可发现,禹城市从西南到东北海拔高度呈下降趋势,但海拔高度变化不大(图 4a)。坡度平均在 0.45°左右,变化很轻缓(图 4c),但地形仍存在微小的起伏。曲率是表示曲线偏离直线的程度。曲率越大,表示曲线的弯曲程度越大,同时有正负、凸凹之分。统计结果表明,该区测产田块地形的曲率、平面曲率和剖面曲率的平均数值均为较大的负值,说明该地区地表相对低洼地形较多(图 4d~4f)。

2.3 地形对土壤属性及玉米产量的影响

为了明确禹城市地形对玉米产量的影响,首先对地形和土壤属性进行主成分分析,获得影响作物产量的可能因子,然后,将测产田块的作物产量与这些因子载荷进行相关分析,根据其相关性,获得与产量相关的因子。然后,重点研究地形因子中各个指标对玉米产量变异的影响。

表 2 禹城市测产田块地形属性的描述性统计

Tab.2 Descriptive statistics of terrain attributes of sampling sites in Yucheng county

地形属性	最小值	最大值	平均值	标准差
坡向	0	353.66	144.47	107.51
坡度/(°)	0	1.39	0.45	0.28
海拔高度/m	17.51	28.43	23.22	2.46
曲率	-1.11×10^{-1}	9.88×10^{-2}	-3.74×10^{-4}	4.16×10^{-2}
剖面曲率	-6.17×10^{-2}	5.25×10^{-2}	-1.07×10^{-3}	2.10×10^{-2}
平面曲率	-7.41×10^{-2}	5.19×10^{-2}	-9.50×10^{-4}	2.00×10^{-2}

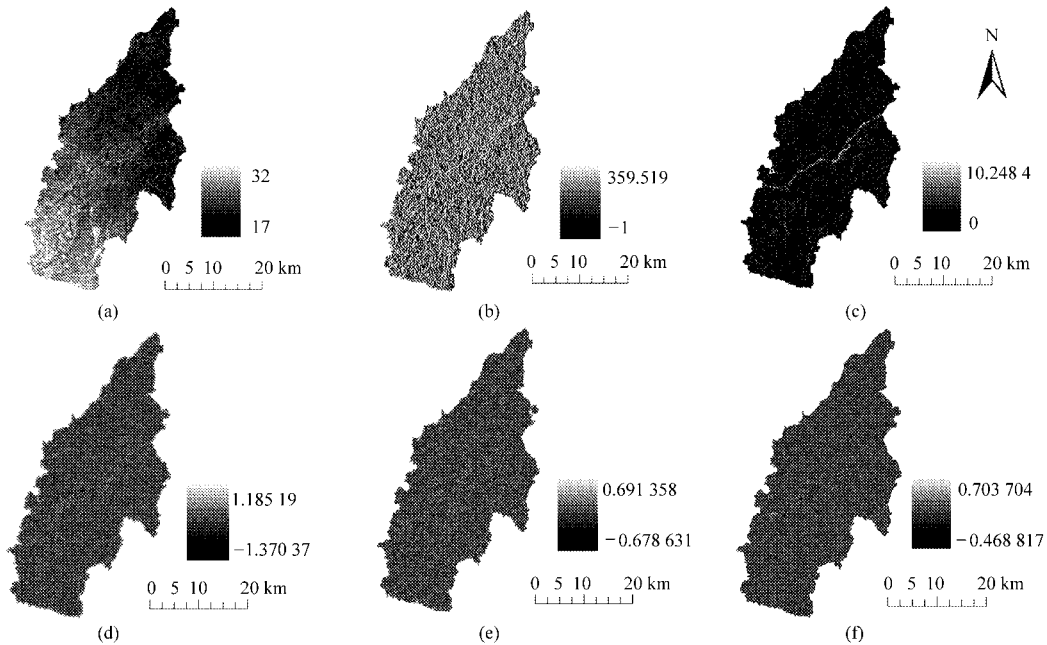


图 4 禹城市地形各项指标的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of terrain attributes in Yucheng county

(a) 海拔高度 (b) 坡向 (c) 坡度 (d) 曲率 (e) 平面曲率 (f) 剖面曲率

2.3.1 影响玉米产量的地形和土壤因子

根据特征值大于 1 的选取原则,共获得 6 个主成分,累计贡献率达 65.7%,如表 3 所示,可以大致反映该地区主要的地形和土壤作用过程。其中,第一主成分(15.29%)在粘粒质量分数、速效钾质量比、阳离子交换量和有机质质量比的因子载荷高,代表了土壤质地和养分因子,解释 15.29% 的方差变异;第二主成分(12.35%)在剖面曲率和平面曲率的因子载荷很高,代表了曲率因子;第三主成分(10.99%)与速效磷质量比、电导率、pH 值有关,代表了土壤盐碱化因子;第四主成分(10.41%)和第五主成分(8.97%)代表了坡度、坡向和土壤养分全量的共同作用;第六主成分(7.18%)代表了地形中的海拔高度因子。

对禹城地区而言,这 6 个因子均有可能对玉米产量空间变异产生影响。将每个测产田块在各因子上的载荷和玉米产量进行相关分析结果表明,玉米产量和第二主成分(曲率因子)的相关系数是 $R = -0.207(p < 0.05)$,和第三主成分(盐渍化因子)的

相关系数是 $R = -0.228(p < 0.05)$,和第六主成分(海拔高度因子)的相关系数为 $R = 0.32(p < 0.01)$,而与其他主成分没有显著的相关性。由此可以看出,影响玉米产量的关键因素是地形的变异及土壤盐渍化,因此,即使在平原地区地形因素仍然是影响作物产量的重要因子。

2.3.2 影响玉米产量的地形指标分析

以上研究了各指标的主成分分析对玉米产量的影响,每个主成分代表的是综合的信息,不能详细地表达每一个地形指标与玉米产量的关系,所以对玉米产量和海拔高度、坡度、坡向、平面曲率和剖面曲率等地形属性分别进行相关分析(表 4),玉米产量与海拔高度有着极其显著的正相关关系($R = 0.263, p < 0.01$)。玉米产量与平面曲率呈显著负相关($R = -0.245, p < 0.05$)。与其他属性未表现出显著相关性。另外,玉米产量和土壤电导率间呈显著负相关($R = -0.232, p < 0.05$)。

将地形的各个属性与 2008 年玉米产量进行多元逐步回归分析,获得了玉米产量与地形属性间具

有明显相关性的回归方程,即

$$Y=4.276+0.15X_1$$
$$(R^2=0.069,F=7.229>F_{0.01}=0.008) \quad (1)$$
$$Y=4.397+0.144X_1-16.376X_2$$
$$(R^2=0.124,F=6.800>F_{0.01}=0.002) \quad (2)$$

式中 Y ——玉米产量,t/hm²
 X_1 ——海拔高度,m X_2 ——平面曲率

式(1)显示,随着海拔高度的增加,玉米产量呈线性增长。其对玉米产量的方差解释度为 6.9%,即海拔高度对玉米产量的影响达 6.9%。式(2)显示,加入平面曲率变量后,对玉米产量的方差解释度提高到 12.4%,说明平面曲率对玉米产量也存在较大的影响。

表 3 禹城市地形和土壤属性旋转因子载荷矩阵

Tab.3 Rotated component matrixes of terrain and soil attributes in Yucheng county

土壤和地形属性	因子载荷					
	1	2	3	4	5	6
粘粒质量分数	0.767	0.144	-0.183	0.091	-0.080	0.106
阳离子交换量	0.740	0.014	-0.175	0.017	-0.093	-0.011
速效钾质量比	0.698	-0.069	0.072	-0.105	0.216	0.014
有机质质量比	0.621	0.016	0.323	0.180	0.037	-0.224
剖面曲率	-0.001	-0.896	-0.075	-0.012	0.142	-0.083
平面曲率	0.067	0.857	0.080	-0.004	0.100	-0.099
速效磷质量比	-0.009	-0.039	0.792	0.084	-0.296	-0.050
电导率	0.049	0.123	0.619	-0.429	0.120	0.198
pH 值	0.295	-0.317	-0.603	-0.033	-0.256	0.057
坡度	0.228	0.183	0.021	0.688	0.050	-0.160
全钾质量比	-0.264	-0.099	-0.197	0.669	-0.032	0.175
全氮质量比	0.185	-0.090	0.217	0.621	0.082	0.408
坡向	0.149	0.221	-0.053	-0.022	0.752	0.114
全磷质量比	0.104	0.269	-0.002	-0.073	-0.713	0.080
海拔高度	-0.042	-0.002	-0.011	0.073	0.017	0.888
特征值	2.29	1.85	1.65	1.56	1.34	1.15
贡献率/%	15.29	12.35	10.99	10.41	8.97	7.70
累计贡献率/%	15.29	27.64	38.63	49.03	58.00	65.70

表 4 禹城市地形与土壤属性及产量相关性

Tab.4 Correlations between terrain attributes, yields and soil attributes

指标	坡向	坡度	海拔高度	剖面曲率	平面曲率	产量
粘粒质量分数	0.091	0.207 *	0.007	-0.098	0.090	0.099
pH 值	-0.155	-0.058	0.037	0.247 *	-0.195	0.181
电导率	0.126	-0.180	0.049	-0.093	0.113	-0.232 *
阳离子交换量	0.079	0.122	-0.092	-0.021	-0.013	-0.024
有机质质量比	0.032	0.266 * *	-0.108	-0.034	0.138	-0.128
全氮质量比	0.113	0.232	0.219 * *	0.016	-0.019	0.207 *
全磷质量比	-0.162	0.062	-0.038	-0.237 *	0.021	-0.061
全钾质量比	-0.034	0.136	0.100	0.045	-0.178	0.228 *
速效磷质量比	-0.187	-0.020	-0.051	-0.112	0.040	-0.147
速效钾质量比	0.179	0.031	-0.006	0.015	0.044	0.013
产量	-0.086	-0.088	0.263 * *	0.133	-0.245 *	

* 在 $p < 0.05$ 水平上显著(双尾检验);* * 在 $p < 0.01$ 水平上显著(双尾检验)。

2.3.3 地形属性对玉米产量影响原因分析

一般情况下,在海拔高度变化较大的地区,高海拔地区一般会受到土壤侵蚀,养分、水分流失到海拔低处,致使低海拔区作物由于能获得充足的养分和较高的有效水分而产量较高,产量与海拔高度之间呈现负相关^[2-4, 15];但是,这些地区海拔高度与作物产量之间的关系还受降水量的影响。在高于作物正常需水量的丰水年也会出现相反的情况^[3]。而本文的研究区位于极其平缓的平原,几乎不存在水土流失。通过对地形因子和土壤属性因子进行相关分析可知,海拔高度与土壤中全氮质量比呈显著正相关($p < 0.01$),相关系数为 0.219,而全氮质量比与玉米产量呈显著的正相关($p < 0.05$),所以海拔高度是通过影响土壤全氮来影响玉米产量的变异。禹城市高海拔的地带一般多发育石灰质干润锥形土,该类型土壤比禹城市其他类型的土壤一般养分要高,海拔高度可能是通过土壤类型来影响土壤全氮,进而影响玉米产量。

另一方面,前人研究多数侧重非盐渍化区玉米产量与地形的关系^[1-4],而本文研究区位于盐渍化区,降水过程主要集中在夏秋季节,玉米的生长期雨水丰富,导致地下水位变浅上升,低洼的田块易积水积盐,抑制玉米生长,而海拔稍高田块受盐分影响较弱,玉米的产量高于低海拔地区。

同时,另一结果表明,平面曲率与作物产量间呈显著负相关(表 4)。平面曲率表示地平面的起伏程

度,平面曲率越大产量越低,说明平原地区微地形的起伏对产量影响较大。而有研究表明,黄淮海平原地区往往在地形起伏较大的地区,如坡、洼交错的中、小地形区,水盐运动较为明显^[21-22]。可见,禹城地区地形对玉米产量的影响是通过影响土壤的水盐动态,进而影响作物生产。玉米产量与土壤盐分间不存在显著相关关系,其原因可能与盐分的动态变化有关,因为土壤中盐分会随着季节的不同而变化。在采样季节土壤的盐分含量不能完全反映整个生产期的盐分含量。

3 结束语

尽管禹城市海拔高度相差不大,地表起伏微小,但是,地形还是对玉米产量产生了明显的影响,导致其在空间上随着地势的降低,从西南到东北呈下降趋势。玉米产量与地形属性间的相关性表现为,与地面海拔高度呈显著正相关,与平面曲率呈显著负相关,而与坡度、坡向相关性不明显。地形因子对禹城市玉米产量空间变异大约起到 12.4% 的作用,主要是通过土壤的肥力变化和盐分动态影响农作物生产。可见,在半湿润的平原地区,地形的微小变化对农作物生长的影响还是较为明显的。因此在盐渍化平原地区进行作物种植管理时要注意地形低洼及起伏相对较大地区的农田管理,加强排水设施的配套与完善,以消除地形因素对作物生长带来的负面效应。

参 考 文 献

1 郑海峰, 赵新峰, 马岩. 地形和土壤属性对大豆产量的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(6):134 ~ 138.
Zheng Haifeng, Zhao Xinfeng, Ma Yan. Soybean yields related to topography and soil properties [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(6):134 ~ 138. (in Chinese)

2 Kravchenko A N, Bullock D G. Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties [J]. Agronomy Journal, 2000, 92(1):75 ~ 83.

3 Kaspar T C, Colvin T S, Jaynes D B, et al. Relationship between six years of corn yields and terrain attributes [J]. Precision Agriculture, 2003, 4(1):87 ~ 101.

4 Hobbs R J. Integrated landscape ecology:a western australian perspective [J]. Biological Conservation,1993,64(3):231 ~ 238.

5 Marques J R, Silva 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.

6 Spomer R G, Piest R F. Soil productivity and erosion of Iowa loess soils [J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1982, 25(5):1 295 ~ 1 299.

7 Stone J R, Gilliam J W, Cassel D K, et al. Effect of erosion and landscape position on the productivity of piedmont soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1985, 49(4):987 ~ 991.

8 Afyuni M M, Cassel D K, Robarge W P. Effect of landscape position on soil water and corn silage yield [J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(6):1 573 ~ 1 580.

9 Lyles L. Possible effects of wind erosion on soil productivity [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1975, 30(6):279 ~ 283.

10 Frye W W, Ebelhar S A, Murdock L W, et al. Soil erosion effects on properties and productivity of two Kentucky soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1982, 46(5):1 051 ~ 1 055.

- 11 Lindstrom M J, Nelson W W, Schumacher T E. Quantifying tillage erosion rates due to moldboard plowing [J]. *Soil Tillage Research*, 1992, 24(3):243 ~ 255.
- 12 Pierson F B, Mulla D J. Aggregate stability in the Palouse region of Washington: effect of landscape position [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1990, 54(5):1 407 ~ 1 412.
- 13 Malo D D, Worcester B K, Cassel D K, et al. Soil-landscape relationships in a closed drainage system [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1974, 38(5): 813 ~ 818.
- 14 Chi B L, Bing C S, Walley F, et al. Topographic indices and yield variability in a rolling landscape of western Canada [J]. *Pedosphere*, 2009, 19(3):362 ~ 370.
- 15 余玲, 王彦荣, 毛玉林, 等. 黄土高原地形对苜蓿种子产量和质量的影响 [J]. *草业学报*, 2002, 11(4):62 ~ 67.
Yu Ling, Wang Yanrong, Mao Yulin, et al. Effect of topography on seed yield and quality of alfalfa grown in the Loess Plateau [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2002, 11(4):62 ~ 67. (in Chinese)
- 16 Gee G W, Bauder J W. Particle-size analysis [M] // Klute A. *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods* (SSSA. book series No. 5.). Madison, W I: ASA and SSSA, 1986: 383 ~ 411.
- 17 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- 18 汤国安, 杨昕. Arc GIS 地理信息系统空间分析实验教程 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- 19 陈树人, 肖伟中, 朱云开, 等. 土壤养分和小麦产量空间变异性与相关性分析 [J]. *农业机械学报*, 2008, 39(10): 140 ~ 143.
Chen Shuren, Xiao Weizhong, Zhu Yunkai, et al. Spatial variability and correlation of soil nutrient and wheat yield [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(10):140 ~ 143. (in Chinese)
- 20 刘继龙, 马孝义, 付强, 等. 不同土层土壤特性空间变异性关系的联合多重分形研究 [J]. *农业机械学报*, 2012, 43(5):37 ~ 42.
Liu Jilong, Ma Xiaoyi, Fu Qiang, et al. Joint multiracial of relationship between spatial variability of soil properties in different soil layers [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(5):37 ~ 42. (in Chinese)
- 21 任鑫, 李毅, 李敏, 等. 次生盐渍土垂向剖面斥水性及其与理化性质关系 [J]. *农业机械学报*, 2011, 42(3):58 ~ 64, 79.
Ren Xin, Li Yi, Li Min, et al. Relationship between soil water repellency and soil physical chemical properties for vertical profiles in secondary saline field [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(3):58 ~ 64, 79. (in Chinese)
- 22 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培, 等. 中国盐渍土 [M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- 23 操信春, 吴普特, 王玉宝, 等. 中国灌溉水粮食生产率及其时空变异 [J]. *排灌机械工程学报*, 2012, 30(3):356 ~ 361.
Cao Xinchun, Wu Pute, Wang Yubao, et al. Spatial and temporal variation of crop water productivity in China [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2012, 30(3):356 ~ 361. (in Chinese)

(上接第 106 页)

- 6 乔晓军, 何秀红. 多点土壤温度测量系统的设计与实现 [J]. *沈阳农业大学学报*, 2006, 37(3):278 ~ 281.
Qiao Xiaojun, He Xiuhong. Design and implement of multi-point soil temperature measurement system [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2006, 37(3): 278 ~ 281. (in Chinese)
- 7 薛清华. 高精度多通道温度测量技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
Xue Qinghua. Research on high-accuracy multi-channel temperature measurement technology [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- 8 刘利锋. 单片精密仪器仪表放大器应用电路 [J]. *国外电子测量技术*, 2003, 22(1):29 ~ 30.
Liu Lifeng. Application of the precise instrument amplifier IC [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2003, 22(1): 29 ~ 30. (in Chinese)
- 9 陈勇钢, 吴伯农. AD7705 高精度数据采集的实现 [J]. *国外电子测量技术*, 2006, 25(1):38 ~ 40.
Chen Yonggang, Wu Bainong. Implementation of high precision data acquisition based on AD7705 [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2006, 25(1): 38 ~ 40. (in Chinese)
- 10 尚玉沛, 石林锁, 张振仁. 最小二乘法在高精度温度测量中的应用 [J]. *传感器技术*, 2000, 19(1):47 ~ 48.
Shang Yupei, Shi Linsuo, Zhang Zhenren. Application of least square method in temperature measurement with high accuracy [J]. *Sensor Technology*, 2000, 19(1): 47 ~ 48. (in Chinese)
- 11 姜健飞, 胡良剑, 唐俭. 数值分析及其 MATLAB 实验 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.