

县域尺度作物产量和土壤有机碳密度 时空变化及其相互关系

李娜娜¹, 王蕊², 张彦军¹, 王志齐¹, 李如剑¹, 李俊超², 郭胜利^{1,2,3*}

(1.西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学资源与环境学院, 陕西 杨凌 712100; 3.中科院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 基于作物产量和表层(0~20 cm)土壤有机碳密度(SOCD)数据, 利用 GIS 技术研究了县域尺度(青海乐都县)小麦产量时空变化特征及其与农田表层 SOC 关系。结果表明, 乐都县小麦单产和 SOCD 在空间分布上具有显著区域特征, 地形、土地利用方式等结构性因素影响 SOCD 和作物产量的相关关系。20 世纪 80 年代和 2000 年以后, 乐都县小麦单产与 SOCD 在空间上呈相反分布, 高产区 SOCD 最低, 低产区 SOCD 最高。这两个时间段, 高产区小麦单产增幅仅为 0.5%, SOCD 增幅却达 11.5%; 中、低产区小麦单产均呈增加趋势, 增幅分别为 12.9%、18.9%, SOCD 却呈降低趋势, 降幅分别为 24.6%、29.8%。

关键词: 小麦单产; SOCD; 时空变异

中图分类号: S153.6 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2015)09-1775-07 doi:10.11654/jaes.2015.09.021

Spatio-temporal Variations and Interrelationships of Wheat Yield and Soil Organic Carbon Density at a County Scale

LI Na-na¹, WANG Rui², ZHANG Yan-jun¹, WANG Zhi-qi¹, LI Ru-jian¹, LI Jun-chao², GUO Sheng-li^{1,2,3*}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling 712100, China; 3. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract Soil property and plant growth exist spatial and temporal variations due to the unevenness of effects of natural and human factors across a region. This study investigated the spatio-temporal variations in wheat production and soil organic carbon density(SOCD) in surface soil(0~20 cm) at a county scale(Ledu, Qinghai Province). Wheat yield and SOCD had significant spatial patterns at county scale. However, they showed an opposite spatial distributions in the 1980s and 2000s: the lowest SOCD found in the high-yield fields and the highest SOCD observed in the low-yield fields. From the 1980s to the 2000s, wheat yield had a slight increase of only 0.5%, while SOCD increased by 11.5% in the high-yield fields; wheat yield was increased by 12.9%, but SOCD were decreased by 24.6% in the middle-yield fields; and wheat yield was elevated by 18.9% while SOCD were lowered by 29.8% in the low-yield fields. Topography and land use were the dominant factors influencing the relationships between SOCD and crop yields at county scale.

Keywords crop yield; SOCD; spatial and temporal variability

土壤有机碳(SOC)不仅与温室气体的减排有关, 而且也显著影响土壤生产力的持续性。在农田生态系统中, SOC 升高不仅提高生态系统的碳汇能力, 降低

二氧化碳排放, 同时也可以改善土壤生产力、降低作物产量波动性^[1-2]。因此, Lal^[3]认为, 在农田生态系统中, 土壤有机碳密度(SOCD)增加与作物产量提高具有双赢关系。在区域尺度上, 结构性因子(土壤类型、地貌类型等)和随机性因子(土地利用方式、施肥等)是影响 SOCD 和作物产量的重要因素。研究发现, SOCD 空间变异与结构性和随机性因子密切相关。在黄土高原丘陵区, SOCD 空间变异主要受地形和土地

收稿日期: 2015-03-29

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050504)

作者简介: 李娜娜(1989—), 女, 陕西榆林人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤碳循环及生态环境。E-mail: linana@nwsuaf.edu.cn

* 通信作者: 郭胜利 E-mail: slguo@ms.iswc.ac.cn

利用方式影响^[4];在四川省双流县,土壤类型、地貌类型、土地利用方式、施肥是导致 SOCD 空间变异的重要因素^[5];土壤质地或土壤机械组成也是影响 SOCD 空间变异的重要因素^[6]。相应地,作物产量及其构成因素(气候条件、土壤特性及管理措施等)也存在显著的空间变异。黄土高原小麦产量空间变异主要是受施肥因素的影响^[7-10],而沿淮地区主要与秸秆还田、施肥^[11]、土壤耕作、灌溉和病虫害防治等有关^[12-13]。

尽管 SOCD 和产量空间变化往往存在共同的驱动因素^[14],但二者响应机制存在差异^[15],对二者关系的认识尚存争议。有研究表明,作物产量虽然与 SOCD 呈正相关关系^[16-17],但与 SOC 储量无明显相关性^[18-19];也有研究表明,作物产量与 SOCD 的关系可以用 S 函数、线性或指数函数表示^[20]。针对区域 SOCD 和作物产量时空变化特征及其关系的研究,有助于深入了解 SOCD 与土壤生产力相互关系(尤其复杂地形条件下,农田表层 SOCD 空间变异主要受地形和土地利用方式等因素的影响^[21]),揭示 SOCD 和作物产量空间变异性的关系,对推动精准农业的实施具有重要意义。

1 材料方法

1.1 研究区概况

乐都县(102°06'~102°47' E, 36°11'~36°52' N)地处青海省东北部湟水中游南侧,西与西宁市区相邻,东与民和县毗连,南接化隆县以青沙山为界,北与互助县隔河相望,距省会西宁市 95 km,距甘肃省省会兰州市 115 km。全区南北长 33.6 km,东西宽 23 km,境内大部分为山区,地形复杂,沟壑纵横,湟水河自西向东流经全境,地势南高北低,由西南向东北倾斜,属半高原大陆性气候,降雨量随着海拔升高而递增,时空分布不均匀,季节分布差异明显,年均降雨量为 335.4 mm,气温变化剧烈,年均气温 7 °C,≥10 °C 的积温为 2 458.1 °C,年日照总时数 2 762.5 h,无霜期 144 d,年平均太阳总辐射为 6 079.7 MJ·m⁻²,海拔 1850~4480 m。乐都县是青海的农业区之一,2007 年全县有耕地 24 572 hm²,截至 2013 年底,耕地面积达到 25 100 hm²。全县各耕层土壤养分平均值为有机质 15.3 g·kg⁻¹,全氮 1.27 g·kg⁻¹,速效磷 13.9 mg·kg⁻¹,速效钾 188 mg·kg⁻¹。

据《乐都县志》记载,乐都县农业历史悠久,早在 4000 多年前就有先民在这块沃土上耕耘。新中国成立后,经历了大规模的土地改革,上世纪 80 年代初实行了土地家庭责任承包制。随着农业机械化水平的提

高,化肥投入量的增加,农业生产力得到了很大的提高。乐都县粮食作物主要以小麦(*Triticum aestivum* Linn)为主,其次为青稞(*Hordeum vulgare* L.var.NudumHook.f)、蚕豆(*Pisum sativum* Linn)和马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)。粮食作物播种总面积约 35 000 hm²,占总播种面积的 92.52%,基本上是一年一熟耕作制,受气候和地形等因素影响,其主要轮作方式各有不同。

1.2 数据收集

依据青海省乐都县统计年鉴(乐都县农牧局提供),收集了乐都县 23 个乡镇 1981—2011 年间的小麦单产、化肥投入(主要为氮肥)量、农机拥有量等数据(表 1)。农田 SOCD 数据是青海省第二次土壤普查数据(乐都县农牧局提供)与 2011 年课题人员现场采样所获取。于 1982 年 4 月进行土壤采样,采样人员是乐都县以省土壤普查队为骨干的专业队伍,按照《全国第二次土壤普查暂行技术规程》要求,进行了全县的土壤普查工作。2011 年第二次采样,以土壤类型为

表 1 乐都县农田土壤相关统计数据

Table 1 Agricultural statistics in Ledu county

乡镇 Town	20 世纪 80 年代(1981—1990)			2000 年以后(2001—2011)		
	小麦单产 Wheat yield/ kg·hm ⁻²	氮肥 Nitrogen fertilizer/t	拖拉机 Tractor/ 台·a ⁻¹	小麦单产 Wheat yield/ kg·hm ⁻²	氮肥 Nitrogen fertilizer/t	拖拉机 Tractor/ 台·a ⁻¹
城台乡	1592	51	7	2243	41	170
达拉乡	1721	175	32	2044	179	228
峰堆乡	1538	43	26	2902	67	145
岗沟镇	5138	223	242	5057	327	975
高店镇	5583	230	135	5546	256	1167
高庙镇	5047	522	454	4948	545	2366
共和乡	2033	172	75	2663	177	551
洪水镇	3241	303	211	3765	762	1466
李家乡	1587	50	25	1760	204	286
芦花乡	1253	66	20	1839	244	163
马厂乡	1239	39	19	1302	111	179
马营乡	1468	126	35	2248	241	322
碾伯镇	5186	360	306	5222	885	1790
蒲台乡	1079	75	34	2019	286	287
亲仁乡	1180	73	25	1573	119	79
曲坛镇	2495	99	33	2680	311	399
寿乐镇	1887	64	28	2739	99	632
桃红营	926	34	16	1612	110	47
下营乡	2362	61	18	3084	81	169
引胜乡	3252	147	77	3579	131	437
雨润镇	5166	177	362	5308	216	1256
中坝乡	827	47	21	1451	78	136
中岭乡	1406	46	23	1425	136	207

基准,地形、土地利用方式等为主要参考指标,采取91个土壤样点。本研究选取70个样点,涉及全县农田5种主要土壤类型(草甸土、栗钙土、潮土、灰钙土和黑钙土),70个样点均匀分布在这5种土壤类型中,其中草甸土4个,栗钙土36个,灰钙土19个,潮土5个,黑钙土6个,与其土类面积基本按比例均匀分布。采样时用GPS进行定位,并记录每个采样点的海拔、经纬度、土地利用方式、地形以及采样深度等信息。为了将二普的数据和采样数据进行匹配比较,2011年采样时尽可能根据二普有关信息进行精确定位(一般具体到村庄,如果有特殊标志可以实现和二普数据的重合),并结合当地的实际情况采样(保证二普和现在数据的土壤类型一致)。

1.3 数据处理与分析

小麦单产数据根据小麦总产量及其耕种面积计算得出,每年小麦单产数据取该年份乐都县23个乡镇小麦单产平均值,每年化肥(主要是氮肥)投入数据取该年份乐都县23个乡镇化肥投入数据平均值。高、中、低产区主要是根据产量数值,并结合研究区地貌类型划分。乐都县表层SOC_D采用土壤类型法估算: $SOC_{D_i} = B_i \times \rho \times 20 / 100$ (其中*i*为土壤类型,*B*为土壤容重/ $g \cdot cm^{-3}$, ρ 为SOC/ $g \cdot kg^{-1}$ 。

土壤容重利用环刀法测定。利用环刀将土样取出,每个土壤类型上至少重复5次,分别测定环刀的重量和烘干土加环刀的重量,通过容重计算公式计算出各种土壤类型的容重。SOC测定是新鲜样品混合均匀后在室内自然风干,风干样品过0.25 mm筛后,用H₂SO₄-K₂Cr₂O₇外加热法测定SOC含量。利用Excel对数据进行简单分析,通过Arcgis9.3将乐都县行政图数字化,输出行政图图层,并赋其小麦单产数据属性,然后将其与土壤类型图进行叠加,得到土壤类型-小麦单产图。此外,经过Histogram检验,两期SOC_D值均不服从正态分布,经综合比较,采用指示克里金插值方法,分别制作两期SOC_D的空间分布图及1982—2011年SOC_D变化空间分布图。农田面积通过农田矢量图层在Arcgis9.3中统计得出。

2 结果分析

2.1 县域尺度上产量变化及其时空分异特征

20世纪80年代乐都县农田面积 4.74×10^4 hm²,以湟水水系为主干向两侧延伸呈树枝状分布,高产区(红色斑块)呈条状分布在湟水主干道附近,中产区(绿色斑块)与低产区(蓝色斑块)呈树枝状镶嵌分布

在远离湟水主干道处(图1a)。小麦高产面积(1.08×10^4 hm²)、中产面积(1.85×10^4 hm²)和低产面积(1.8×10^4 hm²)基本持平,各占约1/3,单产分别为4896、2171、1172 kg·hm⁻²。2000年以后农田面积与空间分布格局整体没变(图1b)。高产区(红色斑块)呈条带状分布在湟水主河道附近两侧,面积维持不变,仍为 1.08×10^4 hm²,仍占农田总面积的1/3,小麦单产为

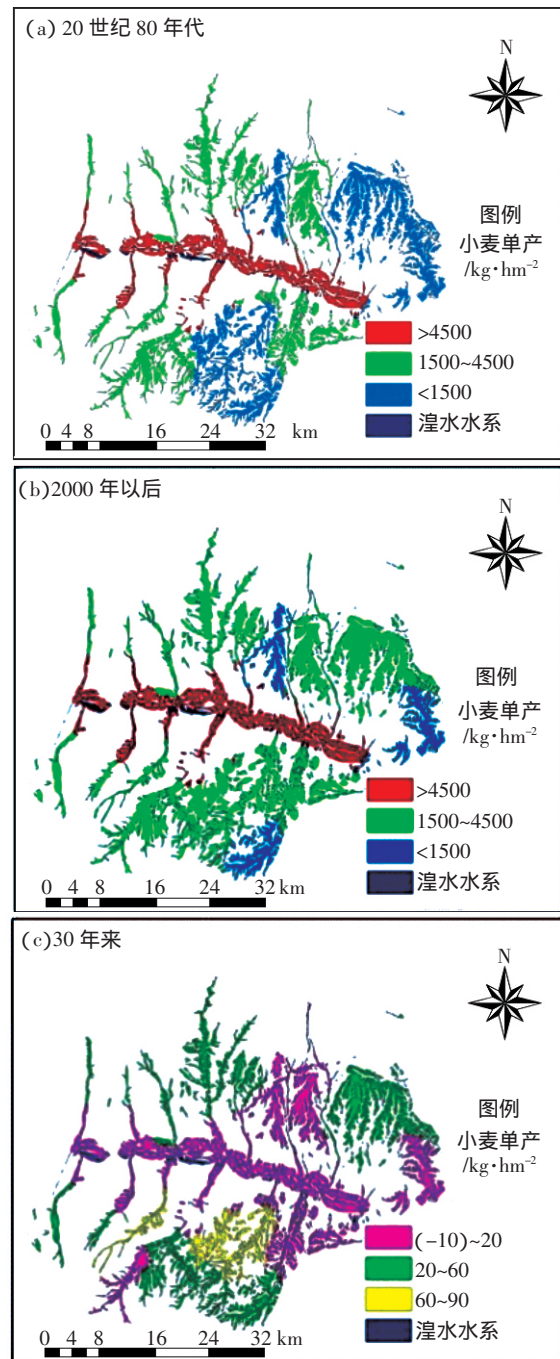


图1 乐都县小麦单产分布

Figure 1 Spatio-temporal distribution of wheat yields in Ledu county

4922 kg·hm⁻²;中产区(绿色斑块)分布在远离湟水主干道的两侧,面积增加至 2.97×10⁴ hm²,增幅达 60.5%,占农田总面积的 62.8%,小麦单产为 2450 kg·hm⁻²;低产区(蓝色斑块)主要分布在东部、北部和东南部的一些地区,且面积降低至 0.69×10⁴ hm²,降幅达 61.7%,仅占农田总面积的 4.3%,小麦单产为 1393 kg·hm⁻²。

30年来小麦单产整体呈增加趋势(图1c)。高产区和中低产区(粉色斑块)小麦单产变化较小,仅增加 10~20 kg·hm⁻²;东南部的低产区(黄色斑块)变化最大,增加 60~90 kg·hm⁻²;大部分中产区(绿色斑块)也呈增加趋势,范围为 20~60 kg·hm⁻²。高、中、低产区增幅分别为 0.5%、12.9%和 18.9%。

2.2 县域尺度农田表层 SOCD 变化特征

乐都县农田表层 SOCD 空间分布差异较大。20世纪 80 年代分布于湟水主干道附近的农田表层 SOCD 较低,仅为 1.95 kg·m⁻²(粉色斑块),远离湟水主干道呈树枝状分布的农田表层 SOCD 较高(图2a),分别为 4.31 kg·m⁻²(绿色斑块)、4.66 kg·m⁻²(蓝色斑块),最高值与最低值相差约 3 倍。2000 年以后农田表层 SOCD 有所变化,分布于湟水主干道附近的农田表层 SOCD 增加至 2.20 kg·m⁻²(红色斑块),远离湟水主干道呈树枝状分布的农田表层 SOCD 均降低(图2b),分别降低至 3.25 kg·m⁻²(绿色斑块)、3.21 kg·m⁻²(蓝色斑块)。30 年来农田表层 SOCD 整体呈下降趋势,分布于湟水主干道附近的低 SOCD 区增幅达 11.5%(红色斑块),远离湟水主干道呈树枝状分布的高 SOCD 区均降低(图2c),降幅分别为 24.6%(绿色斑块)、29.8%(蓝色斑块)。

2.3 县域尺度小麦单产与 SOCD 的关系

31 年间,乐都县小麦单产整体呈增加趋势,增幅为 17%,而农田 SOCD 整体呈下降趋势,降幅为 26%。湟水附近高产区表层 SOCD 较低,20 世纪 80 年代和 2011 年 SOCD 分别为 1.95、2.20 kg·m⁻²,但其小麦单产较高,20 世纪 80 年代和 2000 年以后均高于 4500 kg·hm⁻²,分别为 4896、4922 kg·hm⁻²。湟水附近高产区 SOCD 呈增加趋势,30 年来增幅达 11.5%,但其小麦单产增幅仅为 0.5%(表 2);远离湟水的中产区 SOCD 较高,20 世纪 80 年代 SOCD 为 4.31 kg·m⁻²,至 2011 年降为 3.25 kg·m⁻²,降幅达 24.6%,但其小麦单产较低,从 20 世纪 80 年代 2171 kg·hm⁻²,至 2000 年以后增加为 2450 kg·hm⁻²,增幅达 12.9%;低产区 SOCD 较高,但 30 年来有所降低,20 世纪 80 年代

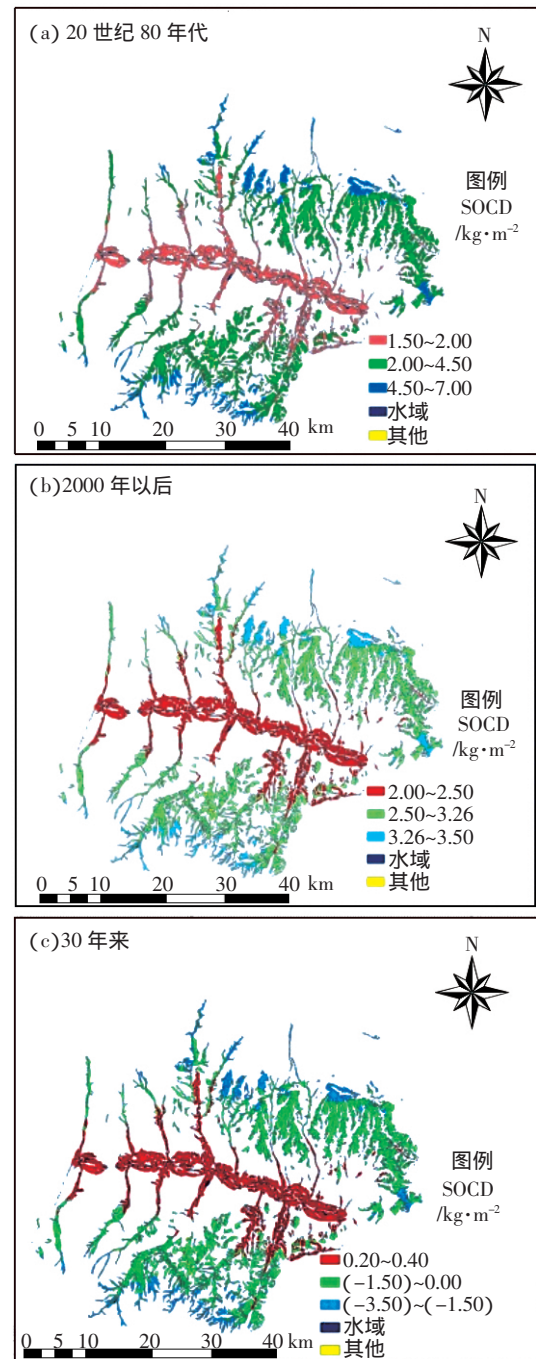


图2 乐都县表层 SOCD 分布

Figure 2 Spatio-temporal distribution of SOCD in Ledu county

4.66 kg·m⁻²,至 2011 年降低为 3.21 kg·m⁻²,降幅达 29.8%,其小麦单产很低,20 世纪 80 年代和 2000 年以后分别为 1172、1393 kg·hm⁻²,增幅达 18.9%。

3 讨论

3.1 县域尺度 SOCD、作物产量变化及影响因素

在时间尺度上,乐都县小麦单产整体呈增加趋势,

表2 乐都县农田土壤相关统计数据
Table 2 Statistical data of farmland in Ledu county

项目 Item	20世纪80年代(1981—1991)		2000年以后(2001—2011)		增幅 Growth rate		
	样本 Sample	均值 Average	样本 Sample	均值 Average			
农田面积/hm ²		总面积	4.74×10 ⁴	总面积	4.74×10 ⁴		
		高产区	1.08×10 ⁴	高产区	1.08×10 ⁴	0%	
		中产区	1.85×10 ⁴	中产区	2.97×10 ⁴	62.8%	
		低产区	1.80×10 ⁴	低产区	0.69×10 ⁴	-61.7%	
小麦单产/kg·hm ⁻²	230	整体	2487±111.35	253	整体	2907±104.34	17%
	50	高产区	4896±35.48	55	高产区	4922±38.73	0.5%
	80	中产区	2171±43.52	33	中产区	2450±45.59	12.9%
	100	低产区	1172±14.73	165	低产区	1393±5.29	18.9%
SOC D/kg·m ⁻²	70	整体	3.8±3.07	70	整体	2.8±1.6	-26%
	24	高产区	1.95±2.35	24	高产区	2.20±1.1	11.5%
	36	中产区	4.31±2.31	36	中产区	3.25±1.3	-24.6%
	10	低产区	4.66±3.01	10	低产区	3.21±1.7	-29.8%
氮肥用量/t	230	整体	138.2±122.96	253	整体	243.5±225.12	76%
	50	高产区	302.2±134.86	55	高产区	445.8±279.79	47.5%
	80	中产区	116.26±80.36	33	中产区	203.41±182.26	75%
	100	低产区	63.06±70.28	165	低产区	108.61±170.03	72.2%
手扶拖拉机/台	230	整体	97±144.55	253	整体	584±629.61	500%
	50	高产区	300±186.53	55	高产区	1511±570.32	400%
	80	中产区	53±34.94	33	中产区	359±333.37	570%
	100	低产区	24±50.28	165	低产区	174±123.09	620%

与我国大部分区域基本一致^[22-23]。究其原因认为与化肥施用量和机械化水平大幅度提高有关^[24-25]。统计资料显示,乐都县农田化肥(尤其是氮肥)施用量至2000年以后提高了76%,农业机械化水平也大幅度提高,手扶拖拉机拥有量增加约5倍(表2)。而作物产量在空间尺度上的变化,与这一县域尺度地形和水分供应等结构性因素有关。作物高产区主要位于用水方便的低洼地带(湟水两岸),而产量较低区域主要位于海拔较高的浅山、脑山地带。此外,尽管上世纪80年代初和2000年以后乐都县高产区与低产区分布格局没有发生改变,但二者随时间变化的趋势不同。高产区尽管农田年均施肥量大幅度提高,手扶拖拉机数量增加了约4倍,但同期这一区域粮食产量并无显著变化,其原因可能与下列因素有关^[26]。湟水两岸地区开垦于汉代,水源充足,灌溉方便,历史上就已经接近最大田间生产力^[26-27];中、低产区则由于大幅度投入,作物产量增幅较大。乐都县农田表层SOC D时空分布存在显著差异,且30年来整体呈下降趋势。综合有机质输入输出的分析,可归因于有机物料还田量少。该结论与黑龙江省和辽宁省近20年来SOC D变化相似^[28],但与我国其他地方研究结果不一致^[29](如山西泽州县16

个乡镇的SOC D均呈增加趋势^[30])。

3.2 地形、土地利用对作物产量和SOC D关系的影响

SOC D是影响土壤生产力的重要因素。Grace等发现,0~10 cm土层内SOC D降低后,作物产量下降了近一半^[31]。在已有报道中,作物产量的高低与有机碳的含量基本一致^[32],但本研究显示,乐都县农田的SOC D与小麦产量在时空上呈现相反变化趋势。

SOC D尽管是影响作物产量高低的重要因素,但在水分呈现显著差异条件下,作物产量将会由水分供应所决定。在乐都县,农业水源一是来自天然降水,二是利用融化的雪水。在湟水两岸的农田,由于地势低洼地可以汲取河水保障作物水分供应,湟水两岸5个乡镇的作物产量维持在较高水平,但远离湟水的浅山或脑山一带,降水为作物的唯一水源,这些地区的乡镇作物产量一般水平较低,并且年际波动剧烈。在一定的区域内,结构性因素地形的高低变化,改变了农田水分供应和作物产量,评价区域上SOC D与作物产量关系时必须考虑结构性因素(地形等)的影响。在同一种地形条件下,作物产量与土壤有机碳关系还与土地利用方式、SOC D初始值等密切相关。湟水两岸的乡镇农田作物产量与SOC D变化关系不大。这一区域

SOCD 较低, 20 世纪 80 年代以来化肥年均投入已达 300 t, 农业机械化水平也较高, 年均手扶拖拉机达 300 台(乐都县统计年鉴), 因此其作物产量一直维持较高水平。土壤耕翻强度增加, 秸秆不还田, 但 SOCD 仍增加。中、低产区远离湟水, 分布在浅山、脑山地区, 由于农田为林草地开荒而来, SOCD 初始含量较高, 变为农田后, 耕翻频繁、有机物输入量较低, 尽管作物产量仍呈增加趋势, 但 SOCD 变化依然呈现降低趋势。因此, 在高产区, 协调高产和培肥同步提升, 在中、低产区, 防止 SOCD 进一步降低等问题值得关注。

本结果也进一步表明, 地形多变地区 SOCD 和产量变化的复杂性。在乐都县, 准确评价区域尺度上 SOCD 和土壤生产力关系需要考虑地形、土地利用等因素的影响。本研究结果对制定类似区农业的精准化管理具有重要参考价值。

4 结论

20 世纪 80 年代和 2000 年以后乐都县小麦单产与 SOCD 高低空间上呈相反分布: 高产区 SOCD 最低, 低产区 SOCD 最高; 两个时间段, 高产区小麦单产增幅仅为 0.5%, SOCD 增幅却达 11.5%, 中、低产区小麦单产均呈增加趋势, 增幅分别为 12.9%、18.9%, SOCD 却呈降低趋势, 降幅分别为 24.6%、29.8%。

参考文献:

- [1] Pan G, Smith P, Pan W. The role of soil organic matter in maintaining the productivity and yield stability of cereals in China[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2009, 129(1): 344-348.
- [2] 张晓伟, 许明祥. 关中地区农田土壤有机碳固存速率及影响因素: 以陕西武功县为例[J]. *环境科学*, 2013, 34(7): 2793-2799.
ZHANG Xiao-wei, XU Ming-xiang. Soil organic carbon sequestration rate and its influencing factors in farmland of Guanzhong plain: A case study in Wugong County, Shaanxi Province[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(7): 2793-2799.
- [3] Lal R. Carbon sequestration in soils of central Asia[J]. *Land Degradation & Development*, 2004, 15(6): 563-572.
- [4] 孙文义, 郭胜利, 周小刚. 黄土丘陵沟壑区地形和土地利用对深层土壤有机碳的影响[J]. *环境科学*, 2010, 31(11): 2740-2747.
SUN Wen-yi, GUO Sheng-li, ZHOU Xiao-gang. Effects of topographies and land uses on soil organic carbon in subsurface in hilly region of Loess Plateau[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(11): 2740-2747.
- [5] 宋莎, 李廷轩, 王永东, 等. 县域农田土壤有机质空间变异及其影响因素分析[J]. *土壤*, 2011, 43(1): 44-49.
SONG Sha, LI Ting-xuan, WANG Yong-dong, et al. Spatial variability of soil organic matter and its influencing factors at county scales[J]. *Soil*, 2011, 43(1): 44-49.
- [6] 赵明松, 张甘霖, 李德成, 等. 苏中平原南部土壤有机质空间变异特征研究[J]. *地理科学*, 2013, 33(1): 83-89.
ZHAO Ming-song, ZHANG Gan-lin, LI De-cheng, et al. Spatial variability of soil organic matter and factor analysis in the south of middle Jiangsu Plain[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(1): 83-89.
- [7] 张少民, 郝明德, 陈磊. 黄土高原长期施肥对小麦产量及土壤肥力的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(6): 85-89.
ZHANG Shao-min, HAO Ming-de, CHEN Lei. Effects of long-term fertilization on yield of wheat and soil fertility in dry-land of Loess Plateau[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006, 24(6): 85-89.
- [8] 郝明德, 来璐, 王改玲, 等. 黄土高原旱地长期施肥对小麦产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(11): 1893-1896.
HAO Ming-de, LAI Lu, WANG Gai-ling, et al. Effects of long-term fertilization on wheat yield on Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11): 1893-1896.
- [9] 郭胜利, 高会议, 党廷辉. 施氮水平对黄土旱塬区小麦产量和土壤有机碳、氮的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(4): 808-814.
GUO Sheng-li, GAO Hui-yi, DANG Ting-hui. Effects of nitrogen application rates on grain yield, soil organic carbon and nitrogen under a rainfed cropping system in the loess tablelands of China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(4): 808-814.
- [10] Guo S L, Zhu H H, Dang T H, et al. Winter wheat grain yield associated with precipitation distribution under long-term nitrogen fertilization in the semiarid Loess Plateau in China[J]. *Geoderma*, 2012, 189: 442-450.
- [11] 马超, 周静, 郑学博, 等. 秸秆还田对土壤养分和小麦产量的影响[J]. *土壤*, 2012, 44(1): 30-35.
MA Chao, ZHOU Jing, ZHEN Xue-bo, et al. Effects of returning rice straw into field on soil nutrients and wheat yields under promoting decay condition[J]. *Soils*, 2012, 44(1): 30-35.
- [12] 刘建刚, 王宏, 石全红, 等. 基于田块尺度的小麦产量差及生产限制因素解析[J]. *中国农业大学学报*, 2012, 17(2): 42-47.
LIU Jian-gang, WANG Hong, SHI Quan-hong, et al. Analysis of yield gap and limiting factors for wheat on the farmland[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2012, 17(2): 42-47.
- [13] 杨玉建, 朱建华, 王殿昌, 等. 农田尺度小麦产量的空间变异研究[J]. *华北农学报*, 2008, 23(S2): 325-328.
YANG Yu-jian, ZHU Jian-hua, WANG Dian-chang, et al. The spatial variability research of wheat yield at the field scale[J]. *Acta Agriculturae Boreali-sinica*, 2008, 23(S2): 325-328.
- [14] Saha R, Ghosh P K. Soil organic carbon stock, moisture availability and crop yield as influenced by residue management and tillage practices in maize-mustard cropping system under hill agro-ecosystem[J]. *National Academy Science Letters-India*, 2013, 36(5): 461-468.
- [15] Shen M X, Yang L Z, Yao Y M, et al. Long-term effects of fertilizer managements on crop yields and organic carbon storage of a typical rice-wheat agroecosystem of China[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, 44(1): 187-200.
- [16] Bauer A, Black A. Quantification of the effect of soil organic matter content on soil productivity[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(1): 185-193.

- [17] Larney F J, Janzen H H, Olson B M, et al. Soil quality and productivity responses to simulated erosion and restorative amendments[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2000, 80(3) :515-522.
- [18] Hairiah K, Van Noordwijk M, Cadisch G. Crop yield, C and N balance of three types of cropping systems on an Ultisol in Northern Lampung [J]. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*, 2000, 48(1) :3-17.
- [19] Duxbury J. Long-term yield trends in the rice-wheat cropping system : Results from experiments and northwest India[J]. *Journal of Crop Production*, 2001, 3(2) :27-52.
- [20] Lal R. Enhancing crop yields in the developing countries through restoration of the soil organic carbon pool in agricultural lands[J]. *Land Degradation & Development*, 2006, 17(2) :197-209.
- [21] 南雅芳, 郭胜利, 李娜娜, 等. 不同地形条件下青藏高原农田土壤有机碳的分布特征 [J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19 (4) :946-954. NAN Ya-fang, GUO Sheng-li, LI Na-na, et al. Soil organic carbon in croplands across different terrains in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(4) :946-954.
- [22] 苏占胜, 陈晓光, 黄 峰, 等. 宁夏山区小麦产量变化特征及其对气候变化的响应[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(2) :218-225. SU Zhan-sheng, CHEN Xiao-guang, HUANG Feng, et al. Variations and responses of wheat yield to climatic change in the mountain area of Ningxia[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2007, 25(2) :218-225.
- [23] 何元龙. 50 多年来黑龙江省小麦产量变化的初步分析[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2009(1) :87-90. HE Yuan-long. Preliminary analysis on the change of wheat output in more than 50 years in Heilongjiang Province[J]. *Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University*, 2009(1) :87-90.
- [24] 栾 江, 仇焕广, 井 月, 等. 我国化肥施用量持续增长的原因分解及趋势预测[J]. 自然资源学报, 2013, 28(11) :1869-1878. LUAN Jiang, QIU Huan-guang, JING Yue, et al. Decomposition of factors contributed to the increase of China's chemical fertilizer use and projections for future fertilizer use in China[J]. *Journal of Natural Resource*, 2013, 28(11) :1869-1878.
- [25] 赵明燕, 熊黑钢, 陈西玫. 新疆奇台县化肥施用量变化及其与粮食单产的关系[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(1) :75-78. ZHAO Ming-yan, XIONG Hei-gang, CHEN Xi-mei. Effect of chemical fertilizer application on grain yield in Qitai County, Xinjiang Uygur Autonomous Region[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(1) :75-78.
- [26] Liu J, Zhu L, Luo S, et al. Response of nitrous oxide emission to soil mulching and nitrogen fertilization in semi-arid farmland[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2014, 188 :20-28.
- [27] 孟 凯, 张兴义, 隋跃宇, 等. 黑土农田水肥条件对作物产量及水分利用效率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(2) :119-121. MENG Kai, ZHANG Xing-yi, SUI Yue-yu, et al. The crop yields and water use efficiencies under different water and fertilizer conditions in the field of black soil[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2005, 13(2) :119-121.
- [28] 陈洪斌, 郎家庆, 祝旭东, 等. 1979—1999 年辽宁省耕地土壤养分肥力的变化分析[J]. 沈阳农业大学学报, 2003, 34(2) :106-109. CHEN Hong-bin, LANG Jia-qing, ZHU Xu-dong, et al. The changes of nutrients on the cultivated soils in Liaoning Province in 1979—1999[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2003, 34(2) :106-109.
- [29] 黄 耀, 孙文娟. 近 20 年来中国大陆农田表土有机碳含量的变化趋势[J]. 科学通报, 2006, 51(7) :750-763. HUANG Yao, SUN Wen-juan. The past 20 years the trend in China's farmland topsoil organic carbon content[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(7) :750-763.
- [30] 潘紫霄. 泽州县土壤肥力状况及施肥对策研究[J]. 山西农业大学学报 :自然科学版, 2003, 23(1) :36-41. PAN Zi-xiao. The state and solving ways of soil fertility in Zezhou county[J]. *J Shanxi Agric Univ*, 2003, 23(1) :36-41.
- [31] Grace P R, Oades J M, Keith H A, et al. Trends in wheat yields and soil organic carbon in the permanent rotation trial at the Waite Agricultural Research Institute, South Australia[J]. *Animal Production Science*, 1995, 35(7) :857-864.
- [32] 邱建军, 王立刚, 李 虎, 等. 农田土壤有机碳含量对作物产量影响的模拟研究[J]. 中国农业科学, 2009, 42(1) :154-161. QIU Jian-jun, WANG Li-gang, LI Hu, et al. Modeling the impacts of soil organic carbon content of croplands on crop yields in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(1) :154-161.