

# 利用黑土层厚度评价东北黑土区土壤生产力

——以鹤北小流域为例

李 骛<sup>1</sup>, 段兴武<sup>2</sup>

(1. 华中农业大学 430070, 湖北 武汉; 2. 云南大学 亚洲国际河流研究中心, 云南 昆明 650091)

**摘 要:** 东北黑土区是中国重要的粮食生产基地, 自开垦以来, 土壤生产力退化严重。探索简易可行的黑土生产力评价方法, 可为合理利用和保护黑土资源提供科学依据。以位于典型黑土区北端的鹤北小流域为例, 基于黑土厚度和土壤理化性质的野外调查, 构建了用黑土层厚度评价土壤生产力的方法。结果表明, 黑土层厚度与土壤生产力水平间呈对数关系, 当黑土厚度小于 40—50 cm 时, 随着厚度增加, 土壤生产力增加明显; 当黑土厚度大于 40—50 cm 时, 随厚度增加土壤生产力增加速度减缓。多年大豆单产及当地土地分等定级的双重验证表明用黑土层厚度评价土壤生产力简易可行, 能够揭示土壤生产力的空间分异。研究区耕作方式对土壤生产力影响显著: 同一地块内从坡顶到坡脚生产力呈增加趋势, 但在等高种植情况下, 地块土壤生产力差异较小, 顺坡或与等高线交叉情况下, 地块土壤生产力差异较大。

**关键词:** 黑土厚度; 土壤生产力; 土壤侵蚀; 耕作方向

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)01-0154-06

中图分类号: S152. 7

## Productivity Assessment for Black Soil Region in Northeastern China Using Black Soil Thickness

—A Case Study of Hebei Watershed

LI Ao<sup>1</sup>, DUAN Xing-wu<sup>2</sup>

(1. Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei 430070, China;

2. Asian International Rivers Center, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650091, China)

**Abstract:** The northeast black soil region, an important grain production area in China, is suffering from serious productivity degradation since long term conventional cultivation. It is helpful to develop an easy and practical productivity assessment method for black soil resources conservation. Soil samples were taken and analyzed for selected fields in the Hebei watershed, located in the north part of typical black soil region of Northeastern China. The quantitative relationship between top soil thickness and soil productivity was established and applied to assess soil productivity. Results showed that there was a logarithmic relationship between top soil thickness and soil productivity, which increased with increasing soil depth. However, the increasing rate varied and the rate was faster for soils at depth less than 40—50 cm than that at depth greater than 40—50 cm. Both long-term soybean yield and local land quality classing certified the rationality of the method, especially for assessing the spatial variation of soil productivity. In the studied watershed, tillage had significantly effects on the spatial distribution of soil productivity, which increased from slope top to toe generally. However, little variation existed within the field for contour cultivated fields, but obvious difference existed for up-down slope cultivated fields. It is necessary to practice conservation tillage.

**Keywords:** black soil thickness; soil productivity; soil erosion; tillage direction

东北黑土区是中国重要的粮食生产基地。据农部的粮食总产量为  $1.07 \times 10^{11}$  kg, 约占全国总产的 18.86%, 其中玉米产量占全国的 33.06%, 大豆占

收稿日期: 2013-10-10

修回日期: 2013-12-20

资助项目: 国家自然科学基金项目“东北黑土区土壤侵蚀对‘作物产量—土壤水分响应关系’的影响”(41371271)

作者简介: 李骛(1992—), 男(汉族), 陕西省杨凌区人, 本科, 研究方向为土地利用与水土保持。E-mail: 1023174810@qq.com。

通信作者: 段兴武(1981—), 男(汉族), 云南省玉溪市人, 博士, 副研究员, 研究方向为土壤侵蚀对土地生产力的影响。E-mail: duanxwu@126.com。

46.78%,人均粮食占有量是全国平均水平的 2.4 倍,在保障国家粮食安全问题上起着举足轻重的作用,被誉为中国粮食生产的“稳压器”<sup>[1-2]</sup>。

黑土养分含量丰富、结构良好、土壤肥力极高<sup>[3]</sup>。自从 20 世纪初大面积开垦以来,黑土土壤理化性质发生了显著变化<sup>[4-8]</sup>,土壤生产力显著降低<sup>[7-9]</sup>,引起黑土土壤生产力变化的原因比较复杂,可主要分为施肥和侵蚀两种。为提高作物产量,自 20 世纪 70 年代末 80 年代初开始,中国开始大量施用化工肥料<sup>[10]</sup>,化工肥料的施用能显著提高作物产量<sup>[11]</sup>,同时也能改变土壤的理化性质<sup>[12-13]</sup>,从而影响到作物品质的提高和土壤肥力的可持续利用<sup>[14]</sup>。另一方面,在高强度的人为耕作下,黑土区土壤侵蚀严重<sup>[1-4]</sup>。据水利部松辽水利委员会 2002 年的统计报告,该区水土流失面积占全区总面积的 27%,发育大型切沟  $2.5 \times 10^4$  条余,吞噬耕地面积约  $3.9 \text{ hm}^2$ <sup>[5]</sup>。每年仅黑龙江省流失的土壤就变化在  $2.0 \times 10^8 \sim 3.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,流失的养分折合标准化肥  $5.0 \times 10^9 \sim 6.0 \times 10^9 \text{ kg}$ ,相当于全省化肥施用总量<sup>[6]</sup>,严重的侵蚀造成土壤养分损失、土壤质地粗化、持水能力降低,直接导致土壤生产力退化<sup>[13]</sup>。在这样的前提下,研究简便易行的土壤生产力评价指标可为黑土资源的合理利用和保护提供理论依据和方法参考。

土壤生产力评价方法可分为定性和定量两种<sup>[15]</sup>。定性评价是通过田间土壤的实地调查和诊断,对土壤宏观性状进行定性描述,多带有经验性,很难量化<sup>[16]</sup>。定量评价主要有 3 种:一是单指标评价;二是多指标表土综合评价,即选取表层土壤多个理化性质指标评价表土生产力;三是多指标土体综合评价,即将整个土体看作是作物生长的环境,选择各个土层的土壤性质指标,将不同深度土层赋予不同的权重,综合、立体地评价土壤生产力,比较有代表性的是土壤生产力指数模型(productivity index, PI)<sup>[17]</sup>,该模型在国内外获得了广泛应用<sup>[18-20]</sup>。段兴武等<sup>[15]</sup>在该模型基础上,根据东北黑土土壤理化性质和作物产量调查结果,构建了适用于东北黑土区的修正的生产力指数模型(modified productivity Index, MPI)并得到多次验证<sup>[21-22]</sup>。但该模型仍然需要采集剖面土壤样本、测定多项土壤理化指标,不利于野外快速和大范围土壤生产力调查与评价。表层黑土养分含量丰富、土壤结构良好,表层黑土厚度(简称黑土层厚度)便于野外调查,对黑土土壤生产力贡献较大<sup>[3]</sup>,被认为是衡量黑土退化程度的重要指标<sup>[7-8,23]</sup>。但时至今日,鲜有探讨黑土层厚度与土壤生产力的研究案例。

本文以位于东北典型黑土区北端的鹤北小流域

为案例区,通过调查和分析流域内不同等级土地的土壤厚度及土壤理化性质,构建了黑土层厚度与土壤生产力间的关系,并据此评价典型地块的土壤生产力空间特征及其影响因素。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省农垦总局九三分局鹤山农场境内的鹤北小流域,地理坐标为  $48^{\circ}59'0''\text{N}$ — $49^{\circ}3'0''\text{N}$ ,  $125^{\circ}16'0''\text{E}$ — $125^{\circ}121'0''\text{E}$ ,属于寒温带大陆性季风气候,冬季漫长,夏季短促,秋季凉爽初霜早,春季风大,年平均气温  $-1.5 \sim 0.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,历年最高气温  $37.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最低气温  $-46.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年降水量在  $400 \sim 500 \text{ mm}$ ,集中于 6—9 月。该区位于小兴安岭南麓,是小兴安岭向嫩江平原过渡地带,属漫岗丘陵区,坡长一般  $800 \sim 1500 \text{ m}$ ,坡度一般  $1^{\circ} \sim 4^{\circ}$ 。自然植被属于温带半湿润草甸草原,土壤属中国发生学分类中的黑土,属中国土壤系统分类中的均腐土<sup>[24]</sup>。

鹤北小流域的面积为  $28 \text{ km}^2$ ,大部分已开垦为农地,且开垦历史都在 60 a 以上。开垦之初,通过种植人工林带将各个地块隔开,且无论是起垄或行播均沿林带方向实行机械化作业。流域内共包括 41 个地块,种植的农作物主要有大豆、小麦和玉米,尤以大豆为主。农业机械化程度高,整地、播种、喷药、施肥、除草和收割等全部实行机械化作业。

### 1.2 样本采集

本研究根据地形状况,选择流域内 20 个典型地块调查土壤厚度和剖面土壤理化性质。

(1) 黑土厚度调查。从调查地块的坡顶开始每 10 m 高差布设一个厚度样点,共计布设厚度样点 122 个。利用半圆钻(长 1 m,可加延长杆,直径 4 cm)采集土样,将样本以 10 cm 为间隔按照厚度顺序放入铝盒。为防止打钻过程中将土壤压实,每次打钻厚度控制在 30 cm 以内,直至采到母质层。全剖面样采完后,参照土壤发生分层标准划分土层,并利用比色卡判定黑土厚度<sup>[25]</sup>。回室内风干后,再判定一次。

(2) 剖面土样采集。根据厚度分析结果,选择其中 18 个地块参照标准方法采集剖面土样<sup>[25]</sup>,具体方法如下:在地块中部地形变化不大且黑土层厚度接近地块平均厚度的部位挖取剖面,以 20 cm 间隔分层采样,直至母质下 20 cm 为止,18 个地块共获取分层土样 104 个。每层采集 3 个标准环刀原状土样和 1 个混合土样。

(3) 土壤理化性质测定。环刀样本用于测定土壤

容重。混合土壤带回室内风干后参照相关标准<sup>[25]</sup>测定主要理化指标,包括:有机质含量(OM, g/100g),机械组成(砂粒(2~0.02 mm)、粉粒(0.02~0.002 mm)和黏粒(<0.002 mm),土壤凋萎湿度 PWP(%),田间持水量 FC(%),有效含水量 AWC(%),以及 pH 值。OM 含量用重铬酸钾氧化—外加加热法测定;机械组成采用吸管法测定;凋萎湿度和田间持水量用压力膜法测定(压力值分别设为 1.5 MPa 以及 33 kPa),有效持水量取二者之差;pH 值用电位法测定,水土比采用 2.5:1。

### 1.3 土壤生产力指数计算

土壤生产力采用段兴武等<sup>[15]</sup>修订的东北黑土区土壤生产力评价模型 MPI 计算。该模型根据东北黑土的特性,剔除了原模型的容重因子,增加了土壤黏粒含量和有机质含量因子,具体如下:

$$MPI = \sum_{i=1}^n (A_i \times D_i \times O_i \times CL_i \times WF_i)$$

式中:MPI——土壤生产力指数,范围在 0~1,数值越大,表明土壤的生产力越高; $A_i$ ——第  $i$  层土壤有效水含量的适宜性指数; $D_i$ ——第  $i$  层土壤 pH 值的

适宜性指数; $O_i$ ——第  $i$  层土壤有机质含量的适宜性指数; $CL_i$ ——第  $i$  层土壤黏粒含量的适宜性指数; $WF_i$ ——第  $i$  层土壤的权重,反映不同土层理化性质对土壤生产力的影响差异。各模型因子的适宜性指数计算参照段兴武等<sup>[15]</sup>的研究结果。

为了评价模型的精度,收集了鹤山农场调查地块 1990—2008 年的大豆产量统计资料。其中 2007 年为重旱灾年份,产量明显比往年偏低。为了剔除气候灾害的影响,在结果分析中没有采用 2007 年的产量数据。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤生产力指数与黑土厚度的关系

利用 MPI 模型计算了 18 个地块的土壤生产力指数,各地块的土壤剖面平均理化性质及其生产力指数如表 1 所示。案例区土壤以壤土为主,有机质含量平均 2.04%,18 个剖面的黑土层厚度变化在 22~90 cm,平均 41.56 cm,从整个黑土区上看,较开垦初期显著降低<sup>[7-8,26-28]</sup>。土壤生产力指数变化在 0.32~0.82,平均 0.64,不同地块间差异显著。

表 1 典型地块土壤剖面平均理化性质指标和土壤生产力指数 MPI

地块号	等级	容重/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	沙粒/ %	粉粒/ %	黏粒/ %	有机质/ %	有效水/ %	pH 值	黑土厚度/ cm	MPI
6-2-1	1 等	1.37	26.01	39.07	34.92	2.36	8.92	6.32	90	0.74
6-2-2	1 等	1.41	22.82	40.04	37.14	2.26	6.45	6.38	50	0.63
6-4-2	1 等	1.42	38.34	32.11	29.55	1.87	9.35	6.56	30	0.56
9-7	1 等	1.22	28.37	33.64	38.00	3.02	12.53	6.37	50	0.83
6-4-5	2 等	1.49	47.59	28.09	24.32	1.52	11.11	6.04	22	0.58
9-7-2	2 等	1.28	27.85	30.75	41.4	2.57	10.13	6.12	35	0.77
9-7-3	2 等	1.32	18.08	42.58	39.34	2.67	10.47	5.99	30	0.79
9-8-3	2 等	1.41	40.55	27.93	31.52	2.15	9.76	6.51	25	0.68
6-3-2	3 等	1.42	28.81	33.52	37.67	2.05	9.08	6.83	34	0.69
6-4-1	3 等	1.32	30.78	36.02	33.2	2.88	11	6.29	70	0.71
6-8-2	3 等	1.55	49.46	21.48	29.07	1.13	8.02	6.86	22	0.32
9-6-4	3 等	1.32	31.68	30.39	37.93	1.85	9.27	6.06	30	0.58
6-4-4	4 等	1.47	37.86	29.68	32.46	1.62	9.63	6.58	28	0.58
6-9-5	4 等	1.37	46.32	25.6	28.08	1.81	13.32	6.42	40	0.62
9-2-2	4 等	1.46	39.95	27.57	32.47	1.36	8.2	6.72	50	0.5
9-5	4 等	1.42	39.08	34.29	26.63	1.4	7.43	6.08	25	0.45
6-3-4	5 等	1.36	49.37	27.76	22.87	1.59	14.56	6.51	27	0.58
6-9-1	5 等	1.26	36.58	28.85	34.57	2.66	12.53	6.11	90	0.81
总平均		1.38	35.53	31.63	32.84	2.04	10.09	6.37	42	0.64

MPI 与黑土厚度有显著正相关,相关系数 0.525 ( $p < 0.05$ )。MPI 指数随黑土厚度增加而增加,但在 40—50 cm 处有一个拐点:当黑土厚度小于 40—50 cm 时, MPI 随黑土厚度增加速度较快;当黑土厚度大于 40—50 cm 时, MPI 随黑土厚度增加速度有所

减缓,二者间的关系可用对数函数表达(图 1)。这种变化可能与土壤剖面构成有关,40—50 cm 处土壤性质有较为明显的变化,下部土壤生产力较低,导致增加速度较小,因此,40—50 cm 黑土层厚度可能是黑土保护的一个阈值厚度。

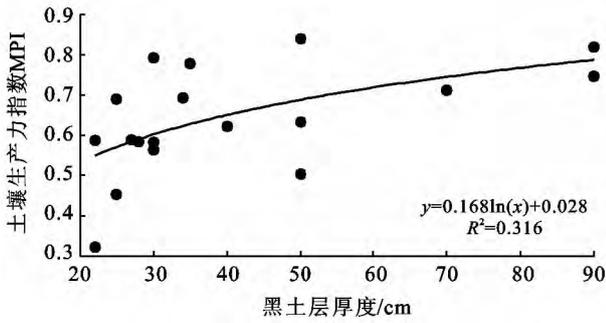


图 1 典型地块黑土厚度与土壤生产力指数 MPI 间的关系

2.2 利用黑土厚度评价地块土壤生产力

利用建立的 MPI 与黑土厚度之间的关系,计算了 20 个地块 122 个厚度样点的 MPI 及其平均值(表 2)。为了验证黑土厚度评价土壤生产力的可行性,统计了各地块 MPI 与 1990—2008 年平均大豆单产及当地土地等级之间的关系。结果表明,地块平均 MPI 与大豆单产为显著正相关,与当地土地等级为负相关(图 2),MPI 随大豆产量增加而增加,随土地等级增高(1 等地土壤质量最高,5 等地土壤质量最低)而降低,表明利用黑土厚度评价黑土土壤生产力可行。

表 2 典型地块平均黑土厚度及 MPI 变化

地块号	地块等级	耕作方式	样点数/个	平均黑土厚度/cm	MPI		
					平均	变幅	标准差
6-2-1	1 等	横 坡	4	90	0.77	0.63~0.84	0.10
6-2-2	1 等	横 坡	7	41	0.65	0.57~0.73	0.06
6-4-2	1 等	顺 坡	4	31	0.61	0.57~0.65	0.03
9-7	1 等	横 坡	3	48	0.68	0.65~0.70	0.03
9-7-1	1 等	横 坡	7	37	0.65	0.60~0.69	0.03
6-4-5	2 等	顺 坡	7	34	0.63	0.53~0.72	0.07
9-7-2	2 等	横 坡	5	36	0.62	0.60~0.63	0.01
9-7-3	2 等	横 坡	5	29	0.63	0.60~0.65	0.02
9-8-3	2 等	交叉等高线	8	36	0.6	0.57~0.63	0.02
6-3-2	3 等	顺 坡	5	53	0.63	0.60~0.72	0.05
6-4-1	3 等	交叉等高线	6	26	0.67	0.57~0.81	0.10
6-8-2	3 等	顺 坡	9	31	0.58	0.55~0.65	0.03
9-6-4	3 等	横 坡	6	29	0.6	0.53~0.65	0.04
6-4-4	4 等	交叉等高线	7	29	0.59	0.49~0.63	0.05
6-9-5	4 等	横 坡	6	29	0.59	0.52~0.65	0.04
9-2-2	4 等	交叉等高线	6	25	0.59	0.52~0.69	0.06
9-5	4 等	横 坡	4	28	0.57	0.53~0.60	0.03
6-3-4	5 等	顺 坡	7	38	0.58	0.49~0.64	0.05
6-9-1	5 等	顺 坡	10	25	0.62	0.49~0.79	0.09
6-5	5 等	横 坡	6	41	0.56	0.49~0.67	0.06
合计/平均			122	37	0.62	0.49~0.84	0.07

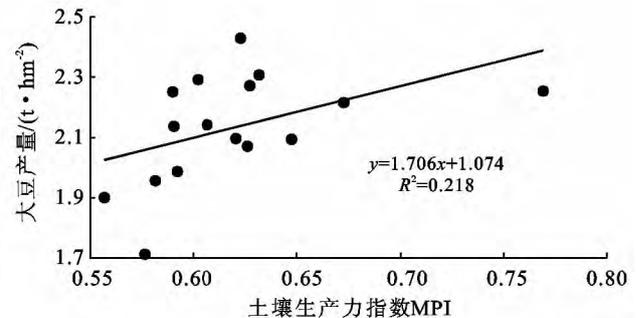
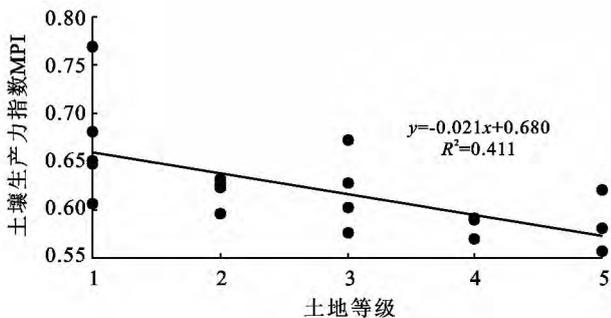


图 2 土壤生产力指数 MPI 与大豆产量及土地等级间的关系

为了分析地块土壤生产力的空间差异,在 ArcGIS 中利用克里金插值方法得到各个地块的黑土厚度及 MPI 的空间分布(图 3)。122 个样点黑土厚度

变化在 15~125 cm,平均厚度为 36.84 cm,其中 85% 以上样点的黑土厚度小于 50 cm。根据本文研究结果,随着侵蚀程度的加剧,这些样点的土壤生产力将

迅速降低,未来土壤侵蚀导致土壤生产力下降不容忽视。为了维持生产力水平,必须采取行之有效的水土保持措施,如等高耕作、免耕等。20 个地块 MPI 变化在 0.48~0.84,平均 0.62,与东北典型黑土区的研究结果相比<sup>[15]</sup>,本案例区生产力水平变幅较小,均值略高,属中等生产力水平。

黑土厚度与 MPI 空间分布一致:总体从坡顶到坡底,土壤厚度增大,土壤生产力水平增加。高生产

力土壤主要分布在底部地块,如 6-2-1 和 6-2-2 号地块;坡顶地块土壤生产力最低,如 6-5 和 9-5 号地块;位于坡中的大部分地块生产力水平居中。从地块内部土壤生产力差异看,等高或接近等高耕作地块的土壤生产力水平差异较小,如 9-7,9-7-1,9-7-2,6-2-1 和 6-2-2 号地块等,而以顺坡、接近顺坡或与等高线有明显交叉耕作的地块,土壤生产力差异较大,如 6-3-2,6-3-4,6-4-2 和 6-4-5 号地块等。

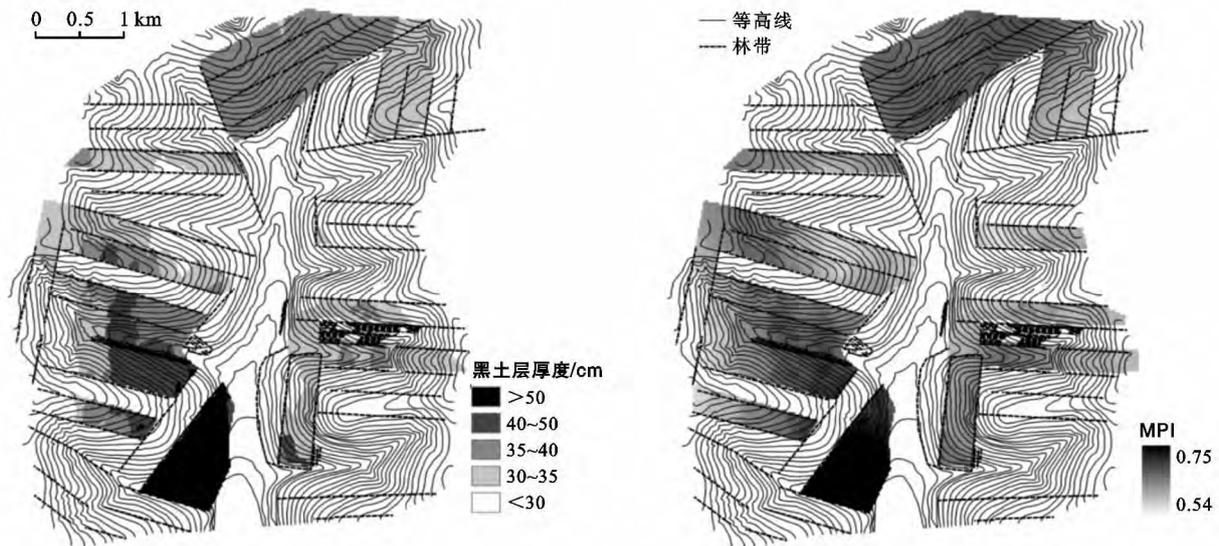


图 3 鹤北流域典型地块黑土厚度及土壤生产力指数 MPI 空间分布

已有研究表明,尽管黑土区水土流失面积较大,但侵蚀的土壤物质大部分没有进入河道,而是在低洼部位堆积下来,形成侵蚀和堆积共存的土壤物质再分布景观特征<sup>[29]</sup>。阎百兴等<sup>[9]</sup>的研究结果也表明,漫岗区黑土从坡脚到坡顶侵蚀程度逐渐增加,由此造成的土壤质量也逐渐降低。这些与本研究结果一致。流域内农地坡度大部分小于 $3^\circ$ ,除等高耕作外没有其他水土保持措施。研究发现,等高耕作地块土壤生产力较高,且空间差异不大,顺坡或与等高线交叉耕作地块土壤生产力较低且空间差异较大,说明耕作方式对土壤侵蚀影响的重要性。顺坡耕作导致坡上黑土加速侵蚀,使结构良好、土壤肥力水平高的表层黑土沉积于坡度较缓的坡脚地区<sup>[29-31]</sup>。作为三北防护林体系重要组成部分的东北地区,在 20 世纪 70—80 年代建设了大面积的防护林带<sup>[32]</sup>。这些防护林逐渐成为黑土区农地的天然地块边界,且决定了地块的耕作方向(一般耕作方向都是平行于地块长边)。案例区当前林带的顺坡布设,导致小流域内地块的耕作以顺坡为主,这无疑加剧了土壤侵蚀速率和生产力退化进程,因此,将来在考虑林带更新时,应注意林带的等高

布设,以便于等高耕作实施,从而减缓侵蚀速率,保护黑土生产力。

### 3 结论

(1) 黑土厚度与土壤生产力呈对数关系,随着黑土厚度增加,土壤生产力水平逐渐增加,但在 40—50 cm 处有较明显的变化,小于该厚度时,生产力随厚度增加显著;大于该厚度时,生产力随厚度增加速度减缓,从而推测 40—50 cm 黑土厚度可能是黑土生产力保护的厚度阈值,应进一步深入研究。

(2) 利用黑土厚度评价土壤生产力简易可行,结果得到了大豆单产及当地土地质量等级的验证。案例区土壤生产力总体从坡顶到坡脚有明显增加趋势,等高或接近等高耕作地块的土壤生产力较高,且地块内生产力空间差异小,顺坡、接近顺坡或与等高线交叉耕作的地块,土壤生产力空间差异较大,耕作方式是导致该区黑土生产力水平退化的重要原因。建议将来林带更新时,应将林带位置及方向等的选择与机械化水土保持耕作措施的实施相结合,以减缓黑土侵蚀速率,保护黑土生产力。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] 刘宝元, 阎百兴, 沈波, 等. 东北黑土区农地水土流失现状与综合治理对策[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(1): 1-8.
- [2] 刘兴士, 阎百兴. 东北黑土区水土流失与粮食安全[J]. 中国水土保持, 2009(1): 17-19.
- [3] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 318-320.
- [4] 刘振举, 蔡强国, 李国强. 东北黑土区水土流失胁迫下的生态安全评价指标体系的建立[J]. 水土保持通报, 2009, 29(6): 64-69.
- [5] 李发鹏, 李景玉, 徐宗学. 东北黑土区土壤退化及水土流失研究现状[J]. 水土保持研究, 2006, 31(3): 50-54.
- [6] 刘丙友. 典型黑土区土壤退化及可持续利用问题探讨[J]. 中国水土保持, 2003(12): 28-29.
- [7] 丁瑞兴, 刘树桐. 黑土开垦后肥力演变的研究[J]. 土壤学报, 1980, 17(1): 20-30.
- [8] 辛刚, 颜丽, 汪景宽, 等. 不同开垦年限黑土有机质变化的研究[J]. 土壤通报, 2002, 33(5): 332-335.
- [9] 阎百兴, 汤洁. 黑土侵蚀速率及其对土壤质量的影响[J]. 地理研究, 2005, 24(4): 499-506.
- [10] 唐近春. 中国土壤肥料工作的成就与任务[J]. 土壤学报, 1994, 31(4): 341-347.
- [11] 李忠芳, 徐明岗, 张会民, 等. 长期施肥下中国主要粮食作物产量的变化[J]. 中国农业科学, 2009, 42(7): 2407-2414.
- [12] 林葆, 林继雄, 李家康. 长期施肥的作物产量和土壤肥力变化[J]. 植物营养与肥料学报, 1994(1): 6-18.
- [13] 刘恩科, 赵秉强, 胡昌浩, 等. 长期施氮、磷、钾化肥对玉米产量及其土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(5): 789-941.
- [14] 徐明岗, 梁国庆, 张夫道. 中国土壤肥力演变[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2006.
- [15] 段兴武, 谢云, 冯艳杰, 等. 东北黑土区土壤生产力评价方法研究[J]. 中国农业科学, 2009, 42(5): 1656-1664.
- [16] 段兴武, 谢云, 张玉平, 等. PI 模型在东北松嫩黑土区土壤生产力评价中的应用[J]. 中国农学通报, 2010, 26(8): 179-188.
- [17] Pierce F J, Larson W E, Dowdy R H, et al. Productivity of soil: Assessing of long-term changes due to erosion[J]. J. of Soil and Water Cons., 1983, 38(1): 39-44.
- [18] Yang J, Hammer R D, Thompson A L, et al. Predicting soybean yields in dry and wet year using a soil productivity index[J]. Plant and Soil, 2003, 250(2): 175-182.
- [19] Lobo D, Lozano Z, Delgado F. Water erosion risk assessment and impact on productivity of a Venezuelan soil[J]. Catena, 2005, 64(3): 297-306.
- [20] Garcia-paredes J D, Olson K R, Lang J M. Predicting corn and soybean productivity for Illinois soils[J]. Agricultural Systems, 2000, 64(4): 151-170.
- [21] 谢云, 段兴武, 刘宝元, 等. 东北黑土区主要黑土土种的容许土壤流失量[J]. 地理学报, 2011, 66(7): 940-952.
- [22] Duan Xingwu, Xie Yun, Ou Tinghai, et al. Effects of soil erosion on long-term soil productivity in the black soil region of northeastern China[J]. Catena, 2011, 87(2): 268-275.
- [23] 张之一. 黑土开垦后黑土层厚度的变化[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2010, 22(5): 1-3.
- [24] 中国科学院南京土壤研究所系统分类课题组. 中国土壤系统分类: 修订方案[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1995: 1-218.
- [25] 刘光菘. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [26] 汪景宽, 王铁宇, 张旭东, 等. 黑土土壤质量演变初探(I): 不同开垦年限黑土主要质量指标演变规律[J]. 沈阳农业大学学报, 2002, 33(1): 43-47.
- [27] 黄健, 张惠琳, 傅文玉, 等. 东北黑土区土壤肥力变化特征的分析[J]. 土壤通报, 2005, 36(5): 659-663.
- [28] 汪景宽, 李双异, 张旭东, 等. 20 年来东北典型黑土地区土壤肥力质量变化[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(1): 19-24.
- [29] 张晓平, 梁爱珍, 申艳, 等. 东北黑土水土流失特点[J]. 地理科学, 2006, 26(6): 687-692.
- [30] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等.  $^{137}\text{Cs}$  示踪技术研究坡耕地黑土侵蚀和沉积特征[J]. 生态学报, 2005, 25(6): 1376-1382.
- [31] 梁爱珍, 张晓平, 杨学明, 等. 耕作方式对耕层黑土有机碳库储量的短期影响[J]. 中国农业科学, 2006, 39(6): 1287-1293.
- [32] 张光辉, 于艳, 刘宝元. 东北黑土区防护林带对土壤水分影响的研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 54-57.