

田块尺度顺坡垄作改等高垄作提高黑土有机质含量

翟星雨^{1,2}, 张兴义^{2*}, 李 浩², 鄂丽丽^{1,2}, 陈 帅², 甄怀才^{1,2}, 谷思玉¹

(1. 东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030; 2. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 哈尔滨 150081)

摘 要: 为了明晰等高垄作后对坡耕地土壤有机质的恢复作用, 选取一块面积为 1.4 hm² 的典型黑土坡耕地, 采用标准栅格法, 同位大样点取样调查了改垄前和改垄 10 a 后土壤有机质和含水率等性状的变化。结果表明: 1) 与经典统计学相比, 地统计学通过变程、块金值与基台值的比值以及插值绘制空间分布图, 能够从全坡面更好地反映改垄前后性状的空间变化; 2) 等高改垄 10 a 后, 垄台土壤含水率变程由 510.7 m 降低到 193.2 m, 块金值与基台值的比值由 11.7% 升至 46.9%, 空间相关性强度由强烈变为中等, 水分再分配降低; 3) 耕层土壤有机质总体增加了 2.61 g/kg, 提升了 8.4%, 只在坡中上部西侧小区的部分区域降低了 3.7%; 4) 土壤全氮含量减少了 0.04 g/kg, 降低了 2.8%。上述结果表明, 对于严重侵蚀的坡耕地, 改顺坡垄为等高垄作, 可弱化性状空间相关性, 对土壤有机质具有恢复作用, 但应适当增加化肥氮素的施用量, 对东北黑土区坡耕地水土流失治理具有指导意义。

关键词: 土壤; 农田; 含水率; 有机质; 等高垄作; 黑土

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.19.020

中图分类号: S157.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2018)-19-0155-07

翟星雨, 张兴义, 李 浩, 鄂丽丽, 陈 帅, 甄怀才, 谷思玉. 田块尺度顺坡垄作改等高垄作提高黑土有机质含量[J]. 农业工程学报, 2018, 34(19): 155—161. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.19.020 <http://www.tcsae.org>
Zhai Xingyu, Zhang Xingyi, Li Hao, E Lili, Chen Shuai, Zhen Huaicai, Gu Siyu. Improving mollisols organic matter content as downslope tillage replaced by contour tillage in field scale[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(19): 155 — 161. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.19.020 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

东北黑土发生了严重退化已是不争的事实, 主要表现在土壤有机质含量下降、结构趋劣、土壤生产力降低^[1-2]。土地退化主要是由高强度的掠夺式经营导致用养失调, 以及坡耕地水土流失致使肥沃的黑土表层变薄^[3]和水分胁迫加重所致^[4]。东北气候冷凉, 旱地农田绝大部分采取垄作, 目的是增加地温并保墒^[5]。开垦之初为了尽快排出融雪, 提高土温, 熟化土壤以及有利于耕作, 多顺坡或斜坡垄作^[6], 然而由于夏季单峰降雨, 土壤水分饱和后, 降雨导致径流汇于垄沟, 当沿垄向存在比降时, 水土流失发生^[7], 部分雨水生成地表径流流出地块, 降低水分利用效率, 加剧坡耕地水分胁迫^[4]; 同时径流冲刷剥离表土, 致使坡上和坡中黑土层变薄, 土壤质量下降, 加剧黑土退化^[8-9]。等高垄作已被证明可有效降低水土流失, 缓解水分胁迫, 提升土壤质量和生产力, 成为东北黑土坡耕地水土保持普遍应用的措施^[10], 但相关的定量研究较为缺乏^[11]。

黑土保护尤其是水土流失防治已得到国家重视, 自 2003 年起以坡耕地为主的东北黑土区水土流失综合治理被列为国家重大工程, 已投资 20 多亿治理水土流失面积

1.8 万 km² ^[5]。经过几十年的水土流失治理实践, 东北黑土区已形成独具特色且效果显著的坡耕地水土保持措施, 国家率先颁布了区域《东北黑土区水土流失综合防治技术标准》SL 446-2009, 规定 3°以下改垄, 3~5°修筑地埂植物带, 5°以上修筑梯田^[12], 规范化和标准化的东北黑土区坡耕地水土保持生态建设, 对保障治理成效有极大的促进作用^[5]。

经典统计学是将数据按独立且随机的样本加以分析, 而某一区域内的土壤性状并不是孤立的, 存在着空间关联, 被称为空间自相关性, 其空间变化被称为空间异质性。地统计学现已广泛应用于地理环境空间相关分析和空间插值制图, 其不但可分析土壤理化性状的空间相关距离, 还可量化由自然和人为因素导致空间变异的比率^[13]。土壤是时空连续的变体, 具有高度的空间异质性, 不论在大尺度上还是小尺度上, 土壤的空间异质性均存在, 地统计学已成为土壤空间变化分析的主要工具^[14]。

黑土坡耕地水土保持生态建设目标是遏制水土流失, 恢复土壤质量, 提升土地生产力^[10,14]。准确定量评价水土保持措施、遏制水土流失、提升土壤质量是科学指导水土保持生态建设的前提条件^[15]。然而在坡耕地水土保持工程项目区, 由于难以找到相近的未治理对照田块, 或者无长期定位观测, 截至目前对黑土坡耕地水土保持措施提升土壤质量的作用鲜见报道^[16]。本文通过对实施水土保持前后全地块大样本取样调查的方法, 从田块尺度系统分析了等高改垄水土保持措施在提升土壤有机质中的作用, 以期黑土坡耕地水土保持生态建设提供科学依据和技术支撑。

收稿日期: 2018-04-10 修订日期: 2018-08-03

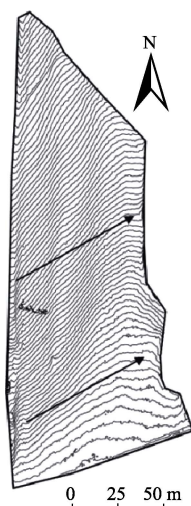
基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFC0504200); 国家自然科学基金 (41571264)

作者简介: 翟星雨, 主要从事黑土水土保持研究。Email: 1042880447@qq.com
*通信作者: 张兴义, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事黑土水土保持研究。Email: zhangxy@iga.ac.cn

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于大豆主产区黑土中部地区的黑龙江省海伦市前进乡光荣村, 年均气温 1.5°C , 年均降雨量 530 mm 。试验坡耕地位于北纬 $47^{\circ}20.493'\sim 47^{\circ}20.630'$, 东经 $126^{\circ}50.354'\sim 126^{\circ}50.405'$ 。南北长 305 m , 东西跨度 78.5 m , 总面积 1.42 hm^2 , 西侧为分水岭, 东侧为已治理完成的侵蚀沟。地势呈西北部略高, 向东南方向倾斜, 南北平均坡度 3.8° , 东西平均坡度 2.2° 。土壤为薄层黑土, 1942 年由榛柴林开垦为农田, 耕作方式为南北向垄作(见图 1)。



注: 波浪线代表等高线; 箭头方向代表改垄后垄向, 相邻等高线高程差 0.2 m 。
Note: The wave line represents contour line, the arrow direction represents ridge direction after the ridge changed, and the elevation difference between the adjacent contour line is 0.2 m .

图 1 试验坡耕地地形及垄向

Fig.1 Topography and ridge direction of experimental slope cropland

1.2 研究方法

1.2.1 试验处理

供试坡耕地 2006 年等高改垄前, 由 12 马力 小型拖拉机进行秋旋耕起垄, 南北向垄作, 耕层深度 15 cm 。2006 年秋用 103 kW 中型拖拉机旋平后, 沿等高线改垄, 垄向坡度小于 1° , 耕层深度 18 cm 以上, 此后耕作方式和垄向维持不变, 试验地一年一熟制, 玉米大豆轮作, 秋收籽实和秸秆全部移出农田, 仍采用当地农民传统化肥施用量, 大豆播种时施底肥, 氮肥和磷肥分别为 120 和 24 kg/hm^2 ; 玉米播种时施氮、磷、钾分别为 69 、 69 和 15 kg/hm^2 , 拔节期追施氮肥 69 kg/hm^2 。

1.2.2 试验方法

地形图用无人机航拍并由三维立体摄影测量软件 PIX4D 生成, 并由水准仪地面测量校准。

整块坡耕地调查采用标准栅格布点法, 样点间距南北 20 m , 东西 10.5 m , 观测点 102 个^[4], 分别于 2004 年和 2016 年 4 月中旬进行 2 次同位点采样调查, 采集每个样点耕层 $0\sim 20\text{ cm}$ 土壤样品, 带回实验室进行分析。

土壤有机质 (SOM) 和全氮 (TN) 含量利用元素分析仪 (ElementarVarioIII, 德国) 测定; 土壤机械组成利用吸管法测定, 采用国际制划分标准; 土壤水稳性团聚体的含量利用土壤团粒分析仪 (DIK-2001, 日本), 采用真空慢速浸润法测定^[17]; 土壤田间持水量和容重利用环刀法取垄台 $2\sim 7\text{ cm}$ 原状土测定; 垄台、垄沟 $0\sim 20\text{ cm}$ 土壤体积含水率使用 TDR100 (Spectrum Field Scout, 美国) 测定。改垄前土壤物理性状见表 1。

1.2.3 数据处理

采用 SPSS10.0 软件包对土壤理化性状进行经典统计学分析, 用美国 Gamma Design Software 公司的地统计学软件 GS+5.3b 进行空间相关性分析及绘制土壤理化性状空间分布图。

表 1 2004 年试验地改垄前土壤物理性状

Table 1 Soil physical properties before ridge direction changed in 2004

土壤性状 Soil properties	样本数 Sample number	最小值 Minimum value	最大值 Maximum value	中值 Median value	平均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数 CV/%	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis
黏粒含量 Clay content/%	102	30.98	44.98	39.83	39.54	3.08	7.80	-0.67	0.01
容重 Bulk density/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	102	0.86	1.42	1.01	1.02	0.09	8.95	0.78	0.51
水稳性团聚体 ($>0.25\text{ mm}$) Water stable aggregate/%	87	72.61	93.26	84.73	84.63	3.12	3.68	-0.60	2.31
田间持水量 Field water capacity/%	102	28.35	58.12	41.75	41.46	5.08	12.25	-0.20	0.82

2 结果与分析

2.1 改垄前后耕层土壤有机质、全氮和水分含量空间异质性

2.1.1 经典统计学分析

经典统计学通过平均值、中值、最大值、最小值、标准差和变异系数等来反映一组数据的变化。经典统计学分析显示, 改垄前 (2004 年), 表层土壤 ($0\sim 20\text{ cm}$) 有机质 (SOM)、全氮 (TN)、垄台和垄沟含水率均有较大的变化, 变化范围分别为 $19.27\sim 52.64\text{ g/kg}$ 、 $0.95\sim$

2.38 g/kg 、 $16.70\%\sim 31.30\%$ 和 $18.20\%\sim 45.60\%$, 变异系数分别为 0.22 、 0.20 、 0.15 和 0.14 , 说明该坡耕地土壤 SOM、TN 和水分含量在空间存在较大变异 (见表 2)。变异系数反映土壤养分含量的变异程度, SOM 和 TN 的变异系数处于 $0.1\sim 1.0$ 之间, 为中等强度变异^[13,18]。理论而言, 一小块无侵蚀的平整耕地, 土壤性状在空间上无变异或有较小的变化, 而坡耕地在成土过程中就存在着空间差异, 开垦后水土流失将进一步加剧其土壤性状的空间异质性。

供试坡耕地自 1942 年开垦为耕地至 2006 年采用顺

坡垄作，水土流失严重，坡上和坡中黑土表土层被地表径流剥离，迁移并多沉积于坡下，使得中上部黑土层变薄，中部黑土层消失，变为“破皮黄”，下部原黑土层被迁移的泥沙掩埋。2004 年设置于地块中部的坡面小区监测结果显示，生育期地表径流系数为 9.8%，土壤流失量为 35.2 t/hm²，即中部表土层年剥蚀厚度为 3.5 mm。田间

的直观表现为中上部田块耕层疏松表土全部向下迁移，坡下部的垄沟全部淤平，即农民所说的“耕多深，冲走多少”，属强烈侵蚀强度^[12]。连续 64 a 高强度的水土流失势必引起表层土壤性状的空间改变，是造成该坡耕地耕层土壤 SOM、TN 和土壤含水率空间变异的主要因素，进而影响土壤质量和农田生产力。

表 2 改垄前（2004）后（2016）土壤性状经典统计学分析
Table 2 Classic statistic analysis of soil properties before (2004) and after (2016) ridge direction changed

土壤性状 Soil properties	年度 Year	样本数 Sample number	最小值 Minimum value	最大值 Maximum value	中值 Median value	平均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数 CV
有机质 Soil organic matter/(g·kg ⁻¹)	2004	102	19.27	52.64	30.20	31.19	6.76	0.22
	2016	102	22.85	51.01	33.75	33.80	5.60	0.17
全氮 Total nitrogen/(g·kg ⁻¹)	2004	102	0.95	2.38	1.39	1.45	0.30	0.20
	2016	102	0.90	2.09	1.36	1.42	0.26	0.18
垄台体积含水率 Water content of ridge/%	2004	102	16.70	31.30	22.30	23.19	3.46	0.15
	2016	102	11.27	37.87	21.50	22.27	6.21	0.28
垄沟体积含水率 Water content of furrow/%	2004	102	18.20	45.60	31.00	30.61	4.43	0.14
	2016	102	18.27	43.53	30.27	30.49	5.04	0.17

改垄 10 a 后（2016 年），表层土壤（0~20 cm）SOM、TN、垄台和垄沟含水率变化范围分别为 22.85~51.01 g/kg、0.90~2.09 g/kg、11.27%~37.87%和 18.27%~43.53%，变异系数分别为 0.17、0.18、0.28 和 0.17（见表 2），SOM 和 TN 含量变化范围以及变异系数均降低，表明实施水土保持等高改垄后，有降低土壤 SOM 和 TN 空间异质性的作用，但仍在 0.1~1.0 之间，属中等强度变异。

上述分析结果表明，经典统计学通过对实测样本土壤理化性状的统计分析，可定量地表述理化性状的状况（平均值）及其变化程度（变化范围和变异系数），但受观测样本数的限制，难以精准反映土壤理化性状的空间变化特征。

2.1.2 地统计学分析

地统计学分析的前提条件是样本数值分布需满足或转化后符合正态分布，数值不少于 25 个^[19]，经检验本研究区土壤 SOM 和 TN 含量符合正态分布，土壤含水率经对数转换后符合正态分布，观测值均为 102 个，满足地统计学分析要求。表 3 给出耕层土壤 SOM、TN 和水分含量半方差函数理论模型及其相应参数，改垄前后土壤 SOM 和 TN 含量决定系数均为 0.99，土壤含水率决定系数也在 0.88 以上，表明理论变异函数模型能够较好用于供试 4 个土壤性状的空间异质性分析。

块金值与基台值之比表示随机部分引起的空间异质性占系统总变异的比例，即能够反映结构因子和随机因子作用比例。就土壤性状而言，结构因子为自然因子，包括地形、坡度、坡长、降雨、土壤等，随机因子为人类活动的作用，包括开垦、施肥、耕作、种植作物以及水土保持措施。改垄前，除垄沟含水率块金值与基台值比值为 25.5%外，其他 3 种性状比值均小于 25%，属于强烈的空间自相关，说明该坡耕地尽管发生了严重的水土流失，土壤性状空间异质性程度仍主要由结构因子影响。改垄 10 a 后，除土壤 SOM 含量外，其他 3 种性状块金值

与基台值比值均增大，在 25%~75%之间，表明人类活动作用增强，空间自相关性由强烈变为中等强度。变程反映区域内性状的有效空间自相关距离的阈值，即为某一点该土壤性状与最远的另一点土壤性状存在空间相关关系的距离。改垄后较改垄前，除土壤 SOM 含量变程未变外，其他 3 种土壤性状变程均减小，表明等高改垄水土保持措施可缩短空间自相关距离，降低坡面的空间异质性，相较于水土流失耕地土壤采样调查，水土保持田块的取样间距应缩短。

表 3 半方差函数理论模型及相应参数
Table 3 Theoretical models of semivariogram and their parameters

土壤性状 Soil properties	年度 Year	样本数 Sample number	最佳模型 Best model	块金值/基台值 Nugget/Sill	变程 Range /m	决定系数 R ²
有机质 Soil organic matter/(g·kg ⁻¹)	2004	102	线性模型	0.175	202.6	0.99
	2016	102	线性模型	0.124	202.6	0.99
全氮 Total nitrogen/(g·kg ⁻¹)	2004	102	线性模型	0.234	202.6	0.99
	2016	102	球状模型	0.396	154.7	0.99
垄台体积含水率 Ridge water content/%	2004	102	球状模型	0.117	510.7	0.99
	2016	102	球状模型	0.469	193.2	0.97
垄沟体积含水率 Furrow water content/%	2004	102	高斯模型	0.255	200.4	0.98
	2016	102	球状模型	0.290	71.9	0.88

2.2 改垄前后耕层土壤 SOM、TN 和水分含量空间分布及其变化

地统计学通过半方差分析选取最佳理论模型，结合观测数据对研究区域进行克里格（Kriging）插值后，绘制土壤性状及其变化（差值）空间分布图。

2.2.1 土壤 SOM 含量

土壤 SOM 含量是农田土壤质量的重要指标，显著地影响农田生产力^[1]。东北黑土区坡耕地明显不同于中国其他区域，其坡缓且长，多顺坡或斜坡垄作，土壤侵蚀特

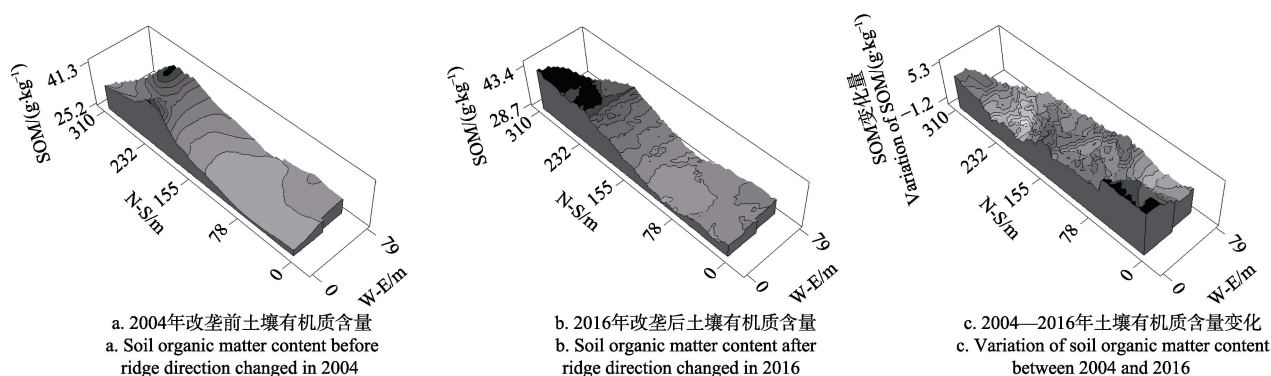
征表现为坡上、坡中表土被剥离变薄,绝大部分沉积于坡脚,以坡中比降最大处侵蚀最为严重^[9]。改垄前连续顺坡垄作 64 a 后坡耕地土壤 SOM 含量空间分布见图 2a,呈从北向南,即从坡上向坡脚西侧降低。黑土坡耕地的土壤侵蚀特征^[9]很好地解释了土壤 SOM 的空间分布特征,坡上土壤 SOM 含量最高是由于其侵蚀强度相对较低,坡中较低是由于其比降大,表土剥离程度最为严重,剥离后的表土逐年多在坡脚沉积,造成沉积区被剥离的土壤所覆盖,坡中土壤 SOM 质量分数为 30 g/kg 左右,黑土层(A 层)消失,过渡层(B)外露,导致沉积区被 AB 和 B 层土壤所覆盖,土壤 SOM 含量较低。改垄 10 a 后,土壤 SOM 含量虽整体略有增加,但其空间分布总体特征较改垄前并未改变(图 2b)。

坡耕地实施水土保持措施,除降低或遏制水土流失外,还具有恢复土壤质量提升地力的作用^[10,14-15]。自然坡面田块难以设置对比试验,加之缺少治理前长时间序列的土壤性状信息,东北黑土区坡耕地水土保持增碳鲜有报道^[16]。本文通过改垄前(2004 年)和改垄 10 a 后(2016 年)全地块相同的 102 个样点进行取样测定,定量获取

了土壤 SOM 含量空间变化(见图 2c)。改垄前 2004 年土壤 SOM 平均质量分数为 31.19 g/kg,等高改垄 10 a 后(2016 年)土壤 SOM 平均质量分数为 33.80 g/kg,10 a 间土壤 SOM 含量增加了 2.61 g/kg,即增加了 8.4%。空间上土壤 SOM 含量变化除中上部西侧小区降低 3.7%外,大部分区域增加,其中以西侧坡脚处增加最多(见图 2c)。

2.2.2 土壤 TN 含量

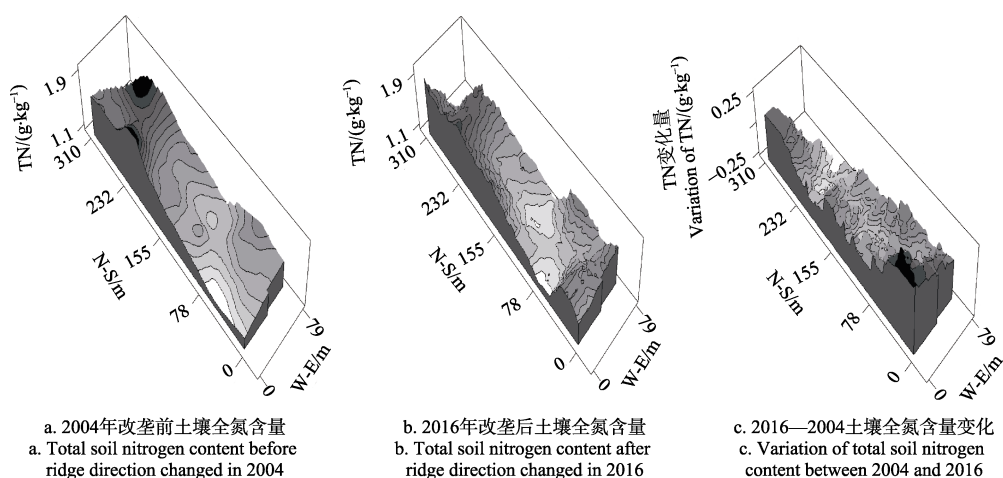
黑土中的 C 和 N 95% 以上以有机态存在,二者含量达极显著相关^[1,4]。改垄前 TN 含量(图 3a)与土壤 SOM 具有相似的空间分布,由坡上向坡下逐渐降低,坡脚处由西向东逐渐升高。改垄 10 a 后除坡脚略增高外,也与改垄后的土壤 SOM 含量空间分布相似。这种坡面分布特征也是由于长期的水土流失所致。改垄前(2004 年)土壤 TN 平均质量分数为 1.45 g/kg,变化范围分别为 0.95~2.38 g/kg。等高改垄 10 a 后的 2016 年土壤 TN 平均质量分数为 1.41 g/kg,变化范围为 0.90~2.09 g/kg,10 a 间土壤 TN 含量下降了 0.04 g/kg,即降低了 2.8%。空间上土壤 TN 含量表现为坡上和坡脚处增加,坡中及坡下部大部分地块降低,降低区域占总面积的 63% (见图 3c)。



注: N-S 代表北-南; W-E 代表西-东; SOM 代表土壤有机质。下同。

Note: N-S indicates north to south; W-E indicates west to east; SOM indicates soil organic matter. The same below.

图2 土壤有机质含量空间分布及其变化
Fig.2 Spatial distribution of SOM contents and its variations



注: TN 代表土壤全氮。

Note: TN indicates soil total nitrogen.

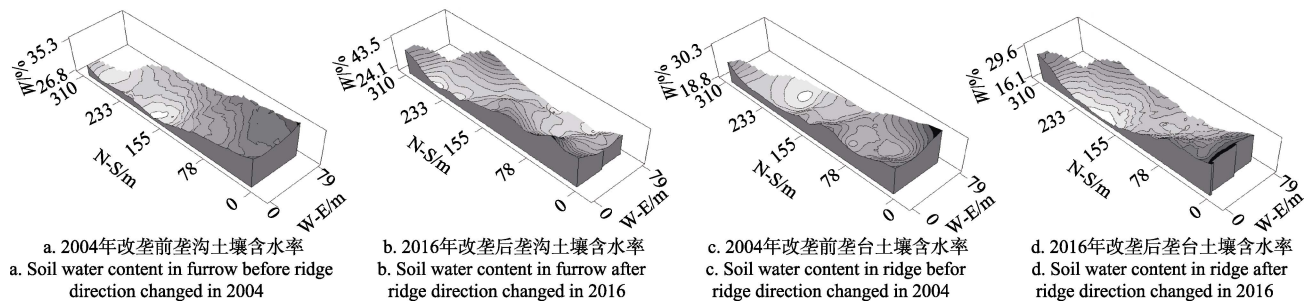
图3 土壤全氮含量空间分布及其变化
Fig.3 Spatial distribution of TN contents and its variations

2.2.3 土壤含水率

2016 年 4 月中旬在供试坡耕地上, 依照 2004 年同时期的 102 个观测点^[4], 再次测定垄沟和垄台 0~20 cm 土壤含水率, 统计发现 2016 年和 2004 年差异较小, 平均含水率几无变化 (见表 2)。采用地统计学半方差分析发现, 改垄后土壤含水率由改垄前的强烈的空间自相关变为中等强度空间自相关 (见表 3), 表明等高改垄可弱化土壤含水率的空间自相关性, 即降低水土流失对土壤水分空间再分配的影响, 具有水土保持作用。

土壤含水率空间分布图可直观展示改垄前后水土流失及水土保持的影响 (图 4)。2004 年为南北顺坡垄作,

坡向和垄向重合, 垄台和垄沟土壤含水率均具有显著的坡耕地分布特征, 从北部坡上至南部坡下逐渐升高, 主要是径流沿垄沟由坡顶向坡下迁移所致, 最低值区出现在坡中上位的侵蚀最严重区。等高改西南-东北向垄后的 2016 年, 垄向和坡向垂直, 土壤含水率不但有沿坡向由上向下增加的变化, 还存在沿垄向由西南向东北的变化, 主要是改垄后沿垄沟的比降趋于零, 地表水存于垄沟只能缓慢运移, 增加了就地入渗, 降低了土壤含水率的空间异质性, 尤其是在雨季的保水能力显著增加, 是降低坡耕地地表径流损失和土壤流失的根本所在。



注: W 代表体积含水率。

Note: W indicates soil volume water content

图 4 改垄前后土壤容积含水率空间分布

Fig.4 Spatial distribution of soil volume water content before and after ridge direction changed

3 讨论

3.1 等高改垄对黑土坡耕地土壤 SOM 和 TN 的影响

已有研究表明坡耕地土壤 SOM 演变方向主要取决于水土流失状况和所处的退化过程^[1,20-22], 以土壤 SOM 含量标识的东北黑土退化过程主要分为熟化过程 (开垦后 20~40 a)、退化过程 (开垦后 40~120 a)、平衡波动 3 个阶段, 在水土流失严重的坡耕地还存在侵蚀退化恶化阶段^[20], 即在有水土流失的坡耕地上平衡阶段被打破, 土壤 SOM 含量进一步下降^[1,20]。实施水土保持措施后允许侵蚀范围内的农田土壤 SOM 含量若低于平衡点, 则向提升的方向发展, 当高于平衡点又未增加有机物料输入时则同平地农田的退化相同, 土壤 SOM 含量下降^[22]。

本研究结果显示全坡面改垄 10 a 后土壤 SOM 增加了 8.4%, 首先是由于该严重侵蚀的坡耕地在实施等高改垄措施后有效地遏制了水土流失, 地表径流系数和土壤流失量分别由改垄前的 9.8% 和 35.2 t/hm² 降为改垄后的 0.48% 和 0.43 t/hm²^[23], 已降为允许侵蚀范围^[12]; 其次是由于研究区退化阶段的土壤 SOM 质量分数为 35~60 g/kg, 低于 30 g/kg 绝大部分位于严重侵蚀的坡耕地上^[1], 基于国际上普遍认可的农田土壤有机碳平衡点理论^[22,24], 研究区无侵蚀农田平衡波动 SOM 质量分数应在 33~35 g/kg^[1], 改垄实施前的土壤 SOM 含量多低于平衡点, 故向提升的方向发展。而降低区位于坡面中上部是由于改垄时 SOM 质量分数为 50 g/kg, 高于平衡点, 农田用养失调导致的退化起决定作用^[20]。改垄后坡耕地地力显著提升, 根系和凋落物在土壤中留存量增加是土壤碳提升的重要来源。前人研究表明, 该坡耕地土壤水分

是生产力的主导因素^[4], 改垄后地表径流系数仅为 0.48%, 年减少生育期降雨损失 49.4 mm, 这部分雨水补充到坡耕地中, 作为有效水, 可显著提高作物生产力, 改垄后大豆和玉米籽实产量分别由改垄前的 1 335 和 3 750 kg/hm² 提高到 2 518 和 9 000 kg/hm², 作物根系、地上生物量和籽实产量密切相关, 随着产量成倍增加^[23], 由根系和凋落物组成的年归还土壤中的有机碳也必将成倍增加, 为土壤有机质提升提供了碳源^[22]。

另外, 已有的研究多报道遏制水土流失后能够提高土壤 SOM 和 TN 含量, 改善土壤质量, 提升土壤生产力^[24-26]。本研究的结果显示, 坡耕地除上部和下部外, 改垄前侵蚀最为严重的约占地块面积一半的中部区域土壤 TN 含量未升反降。分析主要原因是实施水土保持措施后, 作物产量成倍增加, 而农民仍按传统的施肥量施用化肥, 氮肥补给不足, 尤其是玉米, 氮素消耗量大, 不足部分只能通过土壤有机氮库中有机氮矿化分解的氮源弥补, 造成土壤 TN 含量下降, 坡耕地实施水土保持措施增加作物产量多有报道, 而土壤 TN 含量下降鲜有报道^[24], 该试验结果表明为了提高侵蚀退化农田土壤地力, 不但要实施水土保持措施, 还应适当增补氮肥。

3.2 地统计学分析方法对评估田块尺度土壤质量演变具有显著优势

与经典统计学方法相比, 地统计学具有显著优势。首先, 仍具有经典统计的基本结果, 包括平均值、最小值、最大值、标准偏差、偏度和峰度等。其次, 半方差函数分析获取的块金值与基台值比值以及变程参数, 可量化评价性状的空间异质性强度及其变化。就坡耕地而言, 坡面开垦为农田, 人类农作引发水土流失, 导致

土壤性状空间异质性加剧,而水土保持遏制水土流失,可能降低因侵蚀导致的土壤性状空间异质性,缩短空间自相关性距离,本研究等高改垄后,土壤 SOM 含量块金值与基台值比值由 17.5%降为 12.4%,空间自相关强度增加,变程仍为 202.6 m,表明水土保持措施有降低土壤碳空间异质性的作用;土壤 TN 含量块金值与基台值比值由 23.4%增为 39.6%,空间自相关强度由强烈变为中等,变程由 202.6 m 缩短为 154.7 m,这与人类耕种导致坡耕地中部土壤 TN 含量下降,坡上部和坡下部含量增加有关,表明实施等高改垄后土壤 TN 含量的空间相关强度减弱,空间异质性受人类活动影响增加。改垄前后,垄台平均土壤含水率分别为 22.3%和 23.2%,垄沟分别为 30.5%和 30.6%,经典统计分析未发现差异,但地统计学分析发现块金值与基台值的比值,垄台由 11.7%升至 46.9%,垄沟由 25.5%升至 29.0%,由改垄前的强烈的空间相关变为改垄后的中等空间相关,垄台变程由 510.7 m 降低到 193.2 m,垄沟的由 200 m 降低到 2016 年的 71 m,表明水土保持措施增加了人类对坡耕地影响,有降低水土流失对土壤水分空间再分配的作用。此外,利用地统计学方法绘制的土壤性状空间分布图,能够直观反映出其空间变化,如改垄后沿垄向的土壤含水率变化,同时,通过绘制改垄前和后插值空间分布图,可直观地反映全坡面土壤性状增加和降低的区域及其程度。因此地统计学是研究坡面水土保持成效更为高效的方法。

4 结 论

1) 等高改垄水土保持措施可提高严重侵蚀坡耕地黑土 SOM 含量。等高改垄 10 a 后,土壤 SOM 含量增加了 8.4%,以沉积最为严重的坡脚西侧增加最多。

2) 等高改垄水土保持措施降低了土壤 TN 含量。等高改垄 10 a 后,除上部和下部外,改垄前侵蚀最为严重的约占地块面积一半的中部区域土壤全氮含降低了 2.8%,说明为了提高侵蚀退化农田土壤地力,不但要实施水土保持措施,还应适当增补氮肥。

3) 与经典统计学相比,地统计学不但量化改垄前后土壤性状的变化,还定量揭示了水土保持措施对土壤性状空间异质性的作用,通过绘制土壤性状空间分布图,可直观看出改垄前后空间变化,从空间上揭示水土保持作用。

[参 考 文 献]

- [1] 张兴义,隋跃宇,宋春雨. 农田黑土退化过程[J]. 土壤与作物, 2013, 2(1): 1—6.
Zhang Xingyi, Sui Yueyu, Song Chunyu. Degradation process of arable Mollisols[J]. Soil and Crop, 2013, 2(1): 1—6. (in Chinese with English abstract)
- [2] Pimentel D, Burgess M. Soil erosion threatens food production[J]. Agriculture, 2013, 3(3): 443—463.
- [3] 水利部,中国科学院,中国工程院. 中国水土流失防治与生态安全·东北黑土区卷[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [4] 张兴义,王其存,隋跃宇,等. 黑土坡耕地土壤湿度时空演变及其与大豆产量空间相关性分析[J]. 土壤, 2006, 38

(4): 410—416.

- Zhang Xingyi, Wang Qicun, Sui Yueyu, et al. Spatial-Temporal variation of soil moisture and its spatial correlations with soybean yield in black soil sloping farmland[J]. Soils, 2006, 38(4): 410—416. (in Chinese with English abstract)
- [5] 张兴义,回莉君. 水土保持综合治理成效[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.
- [6] 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.
Zhang Zhiyi. The thickness changes of ah horizon after the phaeozems cultivated[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2010, 22(5): 1—3. (in Chinese with English abstract)
- [7] Dunne T. Field Studies of Hillslope Flow Processes [M]//Kirkby, M J. Hillslope Hydrology. Chichester: Wiley, 1978: 227—293.
- [8] 胡刚,宋慧,刘宝元,等. 黑土区基准坡长和 LS 算法对地形因子的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 166—173.
Hu Gang, Song Hui, Liu Baoyuan, et al. Effects of both slope length of standard plot and algorithms of LS on calculated values of topography factor (LS) in black soil areas in Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(3): 166—173. (in Chinese with English abstract)
- [9] 杨维鸽,郑粉莉,王占礼,等. 地形对黑土区典型坡面侵蚀: 沉积空间分布特征的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(3): 572—581.
Yang Weige, Zheng Fenli, Wang Zhanli, et al. Effects of topography on spatial distribution of soil erosion and deposition on hillslope in the typical of black soil region[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(3): 572—581. (in Chinese with English abstract)
- [10] 刘兴土,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.
- [11] Liu X B, Zhang X Y, Wang Y X, et al. Soil degradation: A problem threatening the sustainable development of agriculture in Northeast China[J]. Plant Soil and Environment, 2010, 56(2): 87—97.
- [12] 中华人民共和国水利行业标准. 黑土区水土流失综合防治技术标准: SL 446—2009[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [13] 张世熔,孙波,赵其国,等. 南方丘陵区不同尺度下土壤氮素含量的分布特征[J]. 土壤学报, 2007(5): 885—892.
Zhang Shirong, Sun Bo, Zhao Qiguo, et al. Distribution characteristics of soil nitrogen at multi-scales in hilly region in south china[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007(5): 885—892. (in Chinese with English abstract)
- [14] Morgan R P C. Soil Erosion and Conservation[M]. Cornwall: Blackwell Publishing, 2005.
- [15] Hudson N W. Soil Conservation[M]. London: Batsford, 1976.
- [16] 方华军,杨学明,张晓平,等. 耕作及水蚀影响下坡耕地土壤有机碳动态模拟[J]. 土壤学报, 2006(5): 730—735.
Fang Huajun, Yang Xueming, Zhang Xiaoping, et al. Simulation on dynamics of soil organic carbon under the effect of tillage and water erosion[J]. Acta Pedologica Sinica, 2006(5): 730—735. (in Chinese with English abstract)

- [17] Sun T, Chen Q, Chen Y, et al. A novel soil wetting technique for measuring wet stable aggregates[J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, 141: 19–24.
- [18] 肖波, 王庆海, 尧水红, 等. 黄土高原东北缘退耕坡地土壤养分和容重空间变异特征研究[J]. *水土保持学报*, 2009, 23 (3): 92–96.
Xiao Bo, Wang Qinghai, Yao Shuihong, et al. Spatial variation of soil nutrients and bulk density in rehabilitated slope land on northeast of loess plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(3): 92–96. (in Chinese with English abstract)
- [19] Henley S. Non-parametric Geostatistics[M]. England: Applied Science Publishers L T D, 1981.
- [20] 孟凯, 刘月杰. 黑土退化阶段与强度分析[J]. *农业系统科学与综合研究*, 2008 (4): 476–479, 484.
Meng Kai, Liu Yuejie. Analysis on retrogressive stages and intensity of terra near[J]. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2008(4): 476–479, 484. (in Chinese with English abstract)
- [21] Kirkels F, Cammeraat L H, Kuhn N J. The fate of soil organic carbon upon erosion, transport and deposition in agricultural landscapes: A review of different concepts[J]. *Geomorphology*, 2014(226): 94–105.
- [22] Lal R. Soil carbon dynamics in cropland and rangeland[J]. *Environmental Pollution*, 2002, 116(3): 353–362.
- [23] 张兴义, 张少良, 刘爽, 等. 严重侵蚀退化黑土农田地力快速提升技术研究[J]. *水土保持研究*, 2010, 17 (4): 1–5.
Zhang Xingyi, Zhang Shaoliang, Liu Shuang, et al. Study on technique to fleetly upgrade of productivity of serious eroded black farmland[J]. *Research of Soil Water Conservation*, 2010, 17(4): 1–5. (in Chinese with English abstract)
- [24] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623–1627.
- [25] Maetens W, Poesen J, Vanmaercke M. How effective are soil conservation techniques in reducing plot runoff and soil loss in Europe and the Mediterranean?[J]. *Earth-Science Reviews*, 2012, 115(1/2): 21–36.
- [26] Quine T A, Walling D E, Chakela Q K, et al. Rates and patterns of tillage and water erosion on terraces and contour strips: evidence from caesium-137 measurements[J]. *Catena*, 1999, 36(1/2): 115–142.

Improving mollisols organic matter content as downslope tillage replaced by contour tillage in field scale

Zhai Xingyu^{1,2}, Zhang Xingyi^{2*}, Li Hao², E Lili^{1,2}, Chen Shuai², Zhen Huaicai^{1,2}, Gu Siyu¹

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;

2. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, China)

Abstract: The Mollisols degradation induced by water erosion is a big issue in the slope farmland of northeast China. Ridge direction as the same with contour line (contour tillage) could markedly decrease surface runoff and soil loss compared to downslope tillage, which was widely applied to control soil erosion in the northeast of China. In order to identify the recovery of soil organic matter (SOM) under contour tillage, 102 soil samples were collected and measured in a 1.4 hm² and 3.8° slope farmland by standard grid method in Guangrong village, Heilongjiang province, northeast China, and the soil properties such as SOM and soil water content were measured and compared before and after 10 years of contour tillage by classic statistics (CS) and geostatistics (GS) analysis. The results showed: 1) There was no difference of soil water content before and after 10 years of contour tillage by CS analysis, while GS analysis could well reveal the spatial variation of soil properties in the field before and after ridge direction changed by Range, ratio of Nugget to Sill and spatial distribution maps. 2) The Range of soil water content decreased from 510.7 to 193.2 m, which revealed the spatial heterogeneity of soil water content decreased by contour tillage, namely the water redistribution by surface runoff declined after 10 years of contour tillage. Meanwhile the ratio of Nugget to Sill of soil water content increased from 11.7% to 46.9% indicated that the spatial autocorrelation level changed from intense to medium. 3) The soil erosion was well controlled by contour tillage in the field with the surface runoff coefficient decreased from 9.8% to 0.48%, and annual soil loss changed from 35.2 to 0.43 t/hm². 4) The SOM in the top soil layer of 0–20 cm was increased with 2.61 g/kg and improved by 8.4%, except for a decrease of 3.7% in a small area of the west part of the middle-upper part of the slope after 10 years of contour tillage. 5) The soil total nitrogen (TN) content in the top soil layer of 0–20 cm decreased with 0.04 g/kg and reduced by 2.8%. The TN content increased in the upper slope and foot slope, as that in most part of the middle and lower slope decreased and the area amounted to 63% of the total. Therefore, in order to improve the soil fertility of degraded farmland, water and soil conservation measures are not enough, more nitrogen fertilizer should also be added properly. This study presents important references for soil and water conservation in the Mollisols slope farmland of Northeast China.

Keywords: soils; farmland; moisture; organic matter; contour tillage; Mollisols