doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.09.031

黑土区田块尺度下地形影响作物长势机理分析

刘焕军[1,2]　鲍依临[1]　孟祥添[1]　徐梦园[3]　钱　蕾[1]　张新乐[1]

(1. 东北农业大学公共管理与法学院, 哈尔滨 150030; 2. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012;
3. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100094)

摘要: 为揭示作物长势及水肥运移的空间分异规律,探究田块尺度内作物长势与地形变化的关系,以东北典型黑土区东兴农机合作社为研究区,沿南北垄向提取高精度数字高程模型(Digital elevation model,DEM)与归一化植被指数(Normalized differential vegetation index,NDVI)信息,构建地形指标,分析 NDVI 的空间变异性。结果表明,坡型凸凹程度越明显,NDVI 的空间变异性越大;同类坡型中阴坡 NDVI 的空间变异性与坡型凸凹程度呈负相关;坡度在 ±0.03 范围内,作物长势好,空间变异性低;以坡度绝对值高于 0.04 的坡度均值与其对应直线距离所占整条直线的比值作为变量,构建多元逐步回归模型,进行回归分析,可以解释大豆 NDVI 决定系数为 0.965 2、高粱 NDVI 决定系数为 0.888 3 的空间变异性。不同地理空间的地形与成土母质差异显著,通过分析研究区内地形对作物长势的影响规律,可为田块尺度地形的分析提供借鉴,有助于指导农户合理地进行水肥分配。

关键词: 作物长势; 地形; NDVI; 凸凹程度; Logistic 模型; 空间变异性

中图分类号: S127; TP79　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)09-0274-10　　**OSID**:

Effect of Topography on Crop Growth in Black Soil Area

LIU Huanjun[1,2]　BAO Yilin[1]　MENG Xiangtian[1]　XU Mengyuan[3]　QIAN Lei[1]　ZHANG Xinle[1]

(1. *School of Pubilc Adminstration and Law, Northeast Agricultural University, Harbin* 150030, *China*
2. *Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130012, *China*
3. *College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing* 100094, *China*)

Abstract: Aiming to reveal the differentiation of crop growth and water and fertilizer migration by topography, and explore the relationship between crop growth and slope type change in field scale, a cooperative in typical black soil area of Northeast China was selected as the study area to extract high precision digital elevation model (DEM) and normalized differential vegetation index (NDVI) information along the north and south ridges. The spatial variability of NDVI was analyzed by constructing terrain index. The results showed that the more obvious the degree of terrain protruding and concave was, the greater the spatial variability of NDVI was. The NDVI spatial variability of the same slope type was negatively correlated with the degree of protruding and concave of the slope type, and the crop growth was good and the spatial variability was low within the slope of ±0.03, and the spatial variability was low. The line scale and slope length were above 0.04, which explained the spatial variability of soybean NDVI of 0.965 2 (R^2) and sorghum NDVI of 0.888 3 (R^2). There were significant differences between topography and soil-forming parent material in different geographical space. Through the analysis between crop growth and topographic conditions in the study area, it provided important reference significance for the analysis of field scale topography, and it can guide farmers to allocate resources reasonably, which had strong practicability.

Key words: crops growth; terrain; normalized differential vegetation index; convexity and concavity degree; Logistic model; spatial variability

收稿日期: 2019-12-10　修回日期: 2020-01-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671438)、中国科学院东北地理与农业生态研究所"引进优秀人才"项目和吉林省科技发展计划项目(20170301001NY)

作者简介: 刘焕军(1981—),男,教授,主要从事农业遥感研究,E-mail: liuhuanjun@yeah.net

通信作者: 张新乐(1980—),女,副教授,博士,主要从事生态遥感研究,E-mail: xinlezhang@yeah.net

0　引言

了解农作物空间变异规律可以提升粮食产量的模拟精度。根据田间作物长势，有针对性地进行施肥管理，可以同时改善土壤质量、降低土壤侵蚀带来的影响，对农业可持续发展具有重要意义。随着遥感技术在农业领域的应用与普及，归一化植被指数（Normalized differential vegetation index，NDVI）在农业生产中的作用得到了充分的肯定[1]，NDVI 与土壤有机碳和总氮含量的富集程度呈正相关[2]，并作为重要指标用于生物量分布及产能评估[3]。NDVI 的动态变化不仅受气象驱动变量（如温度、阳光和降水）的影响，不同的环境因素（如海拔、表征水分胁迫、农业管理）也与之相辅相成[4]。已有研究表明，地形因素对作物的影响极为重要，土壤性质和地形（坡度和海拔）的综合作用可较大程度影响植被生物量的变化[5]。因此，探究 NDVI 的空间变异规律对于提供作物和农场状况的详细信息、指导田间管理具有重要意义[6]。

诸多学者已开展了地形对植被长势作用的相关研究，其研究尺度更倾向于大范围的复杂地形[7]。高志强等[8]采用相关分析方法探究中国植被指数的时空变化，水、热和地表植被覆盖类型对植被指数影响和控制的主导地位因时因地而不同，只能从概念上定性地描述植被指数和 3 个主导因子间的关系。魏伟等[9]运用叠置分析法研究了高寒草原区不同海拔和地表覆盖下的 NDVI 变化情况，表明 NDVI 与地形具有很强的相关性。缩小尺度范围可以将地形对作物长势的影响从定性到定量描述。张少良等[10]利用 USLE 模型预测黑土区域土壤侵蚀量的空间分布格局，较好地模拟了不同坡位的土壤流失状况。在此研究的基础上，梁佳辉等[11]在同一区域选定 4 条剖面，探究不同耕层的土壤速效磷在水平和垂直方向的分布规律，证明了侵蚀、沉积与施肥等管理因素对不同坡位各土层剖面速效磷变异性的影响。基于上述研究可提出假设：地形对 NDVI 的作用程度与研究区尺度有关，缩小研究范围有助于减少空间的不确定因素，更好地表达地形与 NDVI 之间的关系。

东北黑土区是我国重要的商品粮基地，其产能与我国粮食安全密切相关，但土壤侵蚀对作物生产构成严重威胁[12]。现阶段关于田块尺度的地形与作物长势差异的研究并不多见，田块内部作物种植结构单一，且田块尺度与实际管理相对应更有利于指导农业生产。因此，本研究获取高精度地形信息，分析同一地块不同年份的作物长势状况，分别从坡型、坡度与曲率分析不同地形条件对于作物长势的影响机理，以探究田块尺度下地形对作物长势的影响规律，以期为精准农业管理提供理论支撑。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于黑龙江省中部海伦市东兴农机合作社，地处松嫩平原东北端，小兴安岭西麓，平均海拔 239 m，地块中心处 47°25′N、126°55′E，面积约 19.35 hm^2，属寒温带大陆性气候，冬季寒冷干燥，夏季温热多雨，年均气温 1.5℃，年均降水量 530 mm，年均有效积温 2 450℃，年均日照时数为 2 600 ~ 2 800 h，无霜期为 125 d。种植作物主要以大豆、高粱轮作为主，一年一熟制，种植期间采取统一的田间管理方式。地势从东北到西南依次呈梯形逐渐降低，地貌属于小兴安岭山地向松嫩平原的过渡地带。土壤类型为典型黑土中的黄土质黑土，漫川漫岗地带，地形起伏较大，作物长势空间差异性显著，研究区位置如图 1 所示。

1.2　数据源与研究方法

1.2.1　地形数据的获取和预处理

2016 年 7 月 15 日，使用定位精度厘米级的海星达 iRTK2 对研究区地块进行实地测量，得到 193 个精确的坐标和高程点，利用 ArcGIS 10.2 将高程数据生成 TIN 图层，将 TIN 图层转成空间分辨率为 4 m 的数字高程模型（Digital elevation model，DEM）栅格数据。2018 年，研究区的中部位置种植玉米，故垄线的提取分布在东西两侧，沿等高线间隔由西至东提取 15 条断面垄线，垄线方向均由北向南（图 2）。依据地形起伏的相似性，将 15 条垄线划分为 5 类坡型，依据阴坡坡型形状特征，可将坡型依次定义为：复合坡、坡腰上部微凸型、坡腰上部中凸型、坡腰强凸型、坡腰中凸型，分别以 A（垄线 1 ~ 2）、B（垄线3 ~ 6）、C（垄线 7 ~ 8）、D（垄线 9 ~ 12）、E（垄线 13 ~ 15）表达，构建直线以连接坡底与坡顶，以便更好地对比各类坡型的特征。

1.2.2　SPOT 影像获取及处理

研究表明，作物收获前 42 ~ 56 d 的 NDVI 信息有助于实现高精度的产量预测[13]。因此，使用大豆生长期 2016 年 7 月 19 日 SPOT－6 遥感数据（多光谱波段的空间分辨率为 6 m），在 ENVI 5.1 中对数据进行大气校正、几何校正，在 ArcGIS 10.2 中按研究区范围进行裁剪并提取 NDVI。

1.2.3　无人机影像获取及处理

本实验采用大疆 M600Pro 型六旋翼飞行器作为遥感平台，搭载 MicaSense RedEdge TM3 型多光

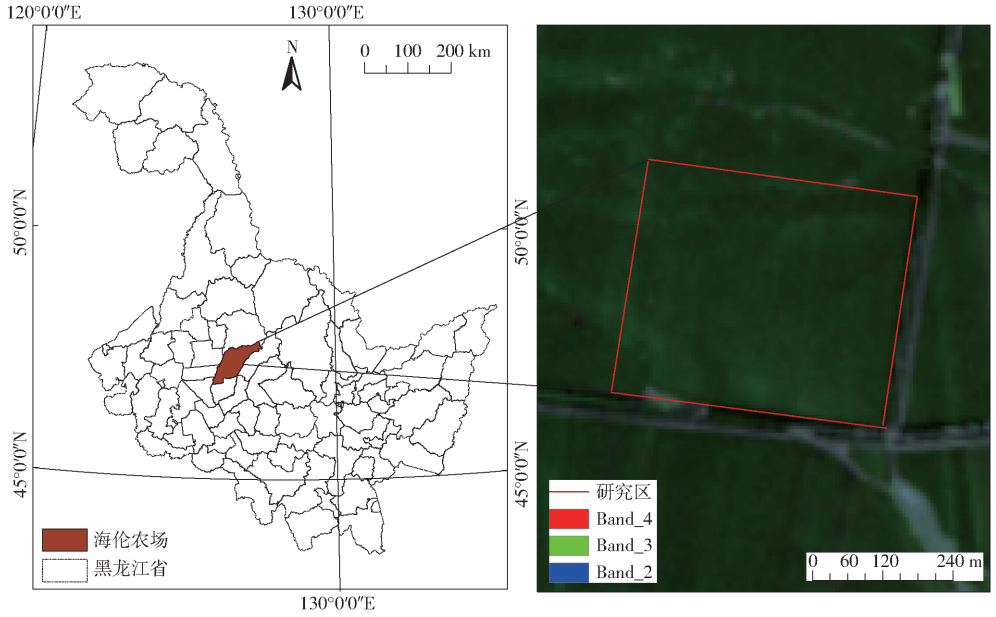


图 1 研究区位置

Fig. 1 Study fields location

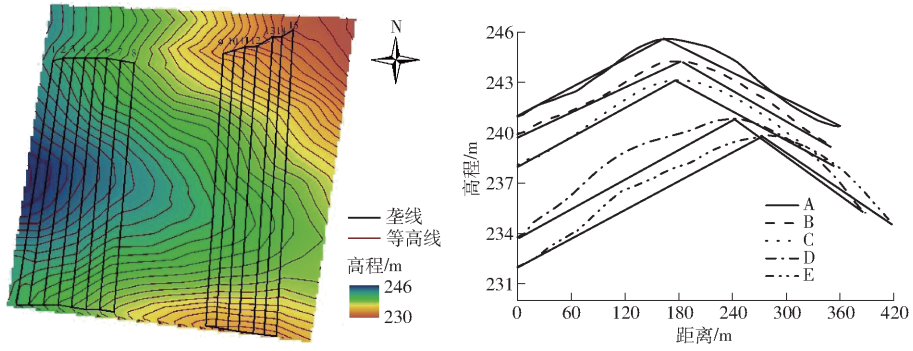


图 2 断面垄线空间分布图

Fig. 2 Ridge spatial distribution map

谱相机,该相机有红、绿、蓝、红边、近红外 5 个波段,成像分辨率为 1 280 像素 ×960 像素,配备光强传感器和一块固定反射率校正白板。在飞行过程中,光强传感器可以校正太阳光线变化对影像所产生的影响,白板具有固定的反射率信息,可以对影像进行校正,生成反射率影像。数据采集时间为 2018 年 7 月 19 日,天气晴朗无云,风速小于 1 级,适合飞行。将相纸交叉摆放,以交叉中心点作为影像事后处理的空间校正点,利用 iRTK2 采集地面控制点坐标。为保证影像的完整和准确,通过地面站设置飞行的航向重叠度为 80%,旁向重叠度为 79%,主航线角 99°,边距 -1.8 m,航线 9 条,飞行高度为 110 m,空间分辨率可达 0.074 m,航拍完成后采用自动返航方式降落。对无人机采集的影像进行筛选,去除姿态角异常、成像存在问题的影像。将筛选后的原始影像和 POS 数据输入 Pix4D mapper 软件,利用软件的农业多光谱影像模块进行影像拼接。软件运行后自动生成连接点并利用内封空三计算模型计算像元位置以及参数,经点云加密后,生成数字表面模型,在此基础上,通过数字微分纠正对影像进行正射校正和镶嵌,最终得到带有地理坐标的正射影像和数字表面模型(图 3)。

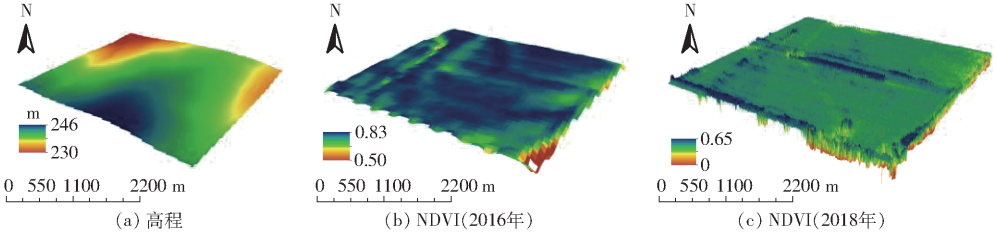


图 3 高程及 NDVI 空间起伏度示意图

Fig. 3 Spatial relief diagrams of DEM and NDVI

由于空间分辨率不同，在 ENVI 5.1 中采用重采样方法减小尺度效应对地形及 NDVI 的影响。

1.2.4　地形因子的计算

坡度：坡面的垂直高度与水平方向距离之比，反映地表单元陡缓程度。

曲率：通过微分定义，计算一定距离上坡度的变化，以表明曲线偏离直线的程度。

基于 DEM 数据获取坡度及曲率数据，利用 ArcGIS 10.2 软件 3D Analyst 模块 slope 及 curvature 工具生成。

坡型凸凹程度：以复合坡（A）为例，定义多种指标对地形进行表达（图 4）。

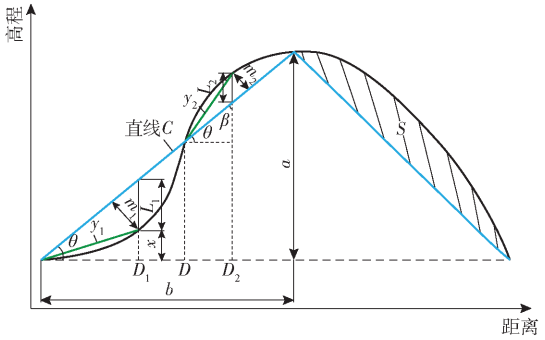


图 4　坡型表达因子示意图

Fig. 4　Slope type expression factor diagram

直线 C 距离：构造直线 C 以连接坡底与坡顶，反映坡长在单位距离内高程的变化，C 由高程差 a 与距离差 b 通过勾股定理求取。

凸凹距离：应用角检测法选取凹坡与凸坡内距离直线 C 最远的点，该点到直线 C 的竖直距离以 L_1、L_2 表示，该点到直线 C 的垂直距离定义为坡距，分别以 m_1、m_2 表示（图 4）。以凹坡为例，y、y_1 分别为坡底至坡顶、坡底至凹陷程度最大处的斜率，则

$$x = y_1 D_1 \tag{1}$$

$$x + L_1 = y D_1 \tag{2}$$

$$y_1 D_1 + L_1 = y D_1 \tag{3}$$

$$L_1 = D_1 (y - y_1) \tag{4}$$

$$L_1 \cos\theta = m_1 \tag{5}$$

根据同位角原理，可得

$$m_1 = L_1 \sin(90° - \theta) \tag{6}$$

式中　x——坡底至凹坡最低处距离

D_1——阴坡凹坡最低处所对应的直线距离

θ——坡顶与坡底夹角

凸凹面积 S：反映坡型凸起或凹陷的程度。将凸起范围按垂直 x 轴的方向分成 n 个小梯形，依据黎曼积分原理，对函数进行积分，当 $n \to +\infty$ 时，Δx 的最大值趋于 0，将所有梯形面积相加即矩形面积和，计算式为

$$S = f(x_1)\Delta x_1 + f(x_2)\Delta x_2 + \cdots + f(x_{n-1})\Delta x_{n-1} \tag{7}$$

因此，凸凹程度由单位直线内的凸凹面积（S/C）与凸凹距离（M/C）表达，S/C 或 M/C 越大，说明坡型变化程度越大。

1.2.5　植被长势分析

计算垄线 NDVI 的平均值估测作物整体长势，NDVI 的标准差反映作物长势差异；依据等距原则，将不同空间分辨率的信息进行重采样处理，计算不同坡面（阴坡、阳坡）NDVI 标准差并与地形因子（斜率 k、凸凹面积 S、凸凹距离 M、凸凹面积与长度比 S/C、凸凹距离与长度比 M/C）进行对比，确定用于表达 NDVI 变化的最适指标。

1.2.6　Logistic 回归模型

Logistic 线性回归模型可以反映因变量影响自变量发生变化的概率。本文选取二分类 Logistic 进行回归模拟，探究研究区内地形因子（DEM、坡度、曲率）导致 NDVI 发生变化的作用程度。将高于垄线 NDVI 均值的栅格标记为 1，其余为 0，将因变量的范围限定在[0,1]范围内，数据以 7∶3的比例分为建模集和验证集，进行建模及精度验证。

1.2.7　数据处理

影像处理及重采样、地形因子的相关计算、相关性分析、多元逐步回归及制图分别在 ArcGIS 10.2、ENVI Classic、Matlab、SPSS stastic22、R Studio、OriginPro 中实现。

2　结果与分析

2.1　坡型与 NDVI 变异规律

2.1.1　不同类坡型分析

由表 1 可知，坡型凸凹面积、凸凹距离、单位直线内凸凹面积、单位直线内凸凹距离均与对应垄线上 NDVI 的变化趋势一致，运用上述指标表达地形凸凹程度可行。坡型凸凹程度越大，NDVI 标准差越大。值得注意的是，A 为复合坡，其复杂的坡型结构使其较其他单一坡型而言，NDVI 空间差异性更为显著。

NDVI 的标准差与 M/C 指标在 0.01 水平上呈现极显著相关（表 2），阴坡相关系数 R 达 0.992，阳坡相关系数 R 达 0.997，达极显著相关。因此，该指标可以更好地反映坡型的凸凹程度，并以此判断 NDVI 空间变异是否显著。

2.1.2　同类坡型植被长势分析

DEM 栅格数据与 2016 年 NDVI 信息的空间分辨率一致，为了探究坡型差异对 NDVI 的影响，绘制 2016 年 15 条垄线的 NDVI 随 DEM 变化曲线（图 5）。

表 1 不同类坡型凸凹程度与 NDVI 标准差关系

Tab. 1 Relationship between concave and convex degrees of different slopes and NDVI standard deviation

坡向	参数	A	B	C	D	E
阴坡	NDVI(2016 年)	0.008	0.010	0.007	0.023	0.026
	NDVI(2018 年)	0.030	0.019	0.020	0.025	0.021
	k	0.336	0.429	0.458	0.434	0.417
	S/m^2	942.678	1 213.100	2 683.350	9 542.760	7 862.680
	M/m	11.677	15.111	16.851	37.931	30.626
	$\frac{S}{C}$/m	3.013	3.894	8.367	21.367	15.767
	M/C	0.037	0.049	0.053	0.085	0.061
阳坡	NDVI(2016 年)	0.048	0.012	0.006	0.015	0.020
	NDVI(2018 年)	0.153	0.027	0.023	0.061	0.077
	k	0.413	0.446	0.494	0.607	0.555
	S/m^2	1 721.010	3 272.640	2 975.840	4 062.760	4 898.620
	M/m	16.270	17.376	17.132	23.174	26.885
	$\frac{S}{C}$/m	5.392	9.675	8.872	13.717	17.074
	M/C	0.050	0.052	0.051	0.078	0.094

表 2 NDVI 标准差与坡型凸凹指标的相关系数

Tab. 2 Correlation coefficient between NDVI standard deviation and slope concave and convexity

		S	M	S/C	M/C
阴坡	NDVI(2016 年)	0.902	0.888	0.824	0.681
	NDVI(2018 年)	0.915	0.939	0.962 *	0.992 **
阳坡	NDVI(2016 年)	0.953 *	0.906	0.934	0.897
	NDVI(2018 年)	0.983 *	0.996 **	0.992 **	0.997 **

注：* 表示显著相关($P < 0.05$)，** 表示极显著相关($P < 0.01$)，下同。

对比发现，同类坡型内 NDVI 的变化趋势一致，且在坡腰处 NDVI 的变化相似。同时，为探究同类坡型内不同凸凹程度对 NDVI 的影响，提取每条垄线的坡型信息。由于阳坡受到的太阳辐射量较强，光热条件好，因此受到更多的氮素胁迫和水分胁迫[14]，增加了影响作物生长的不确定性，故仅对阴坡进行分析，结果见表 3。由表 3 可知，同类坡型中，阴坡坡型凸凹程度与 NDVI 的标准差大体成反比。通过对 B 类和 D 类坡型分析可知，在同类坡型内存在阈值，决定 NDVI 标准差与凸凹程度的相关性。

2.2 坡度及曲率对 NDVI 的影响

2.2.1 Logistic 模型预测结果

Logistic 模型是定量评价模型，预测结果中，ROC(Receiver operating characteristic)曲线用于反映拟合数据与实测数据之间的关系，曲线纵轴为真正类率，即作物长势的优劣；横轴为假正类率，即对长势的错误判断，ROC 曲线越接近纵轴表示模型的模拟效果越优异；AUC(Area under the ROC curve)是 ROC 曲线与坐标轴围成的面积，是度量分类模型性能的标准，其值越接近 1，模型的分类精度越高[15]。以地形因子(DEM、坡度、曲率)为输入量评估 NDVI，结果见图 6。由图 6 可知，大豆 NDVI 的 AUC 为 0.737，高粱 NDVI 的 AUC 为 0.692，计算结果表明，研究区内的 NDVI 受地形影响较为显著，且大豆对于地形变化更敏感。

2.2.2 一定坡度范围内作物长势分析

由图 7 可知，坡度在 ±0.03 范围内作物长势相对均一，因此，选定 0.03 为阈值进行分析。由图 8 可知，坡度在 ±0.03 范围内 NDVI 的变化与作物的类型相关，对于大豆而言，坡度在 ±0.03 范围内 NDVI 均值高于阴坡均值、阳坡均值以及整条坡均值，且该部分的作物长势相对均一；相比整条垄线，该部分的坡度变化较为稳定[16]。而高粱对于地形的敏感性相对较低，在研究区西部 NDVI 均值处于阴坡与阳坡均值之间，东部作物的空间分异规律与大豆相同。

2.2.3 高坡度对作物长势的影响

坡腰下部至坡底处坡型陡峭，植被长势差异较大。根据研究区坡型特征，选取坡度绝对值大于 0.04 部分作物长势进行分析，为探究不同年份、不同作物类型植被长势的共性规律，计算两期 NDVI 的相关系数，结果见表 4。由表 4 可知，超半数垄线的两类植被长势在 0.01 水平上极显著相关，以坡度绝对值高于 0.04 的坡度均值与对应直线的比例为自变量，NDVI 标准差为因变量，构建多元逐步回归模型，结果见图 9。由图 9 可知，坡度绝对值高于 0.04 的坡度均值与其直线的比例可以解释大豆 NDVI 决定系数 0.965 2、高粱 NDVI 决定系数 0.888 3 的空间变异性，由于作物种类及生长所需环境不同，线性拟合的结果存在差异，大豆的生长更易受到地形的影响，这也进一步印证了

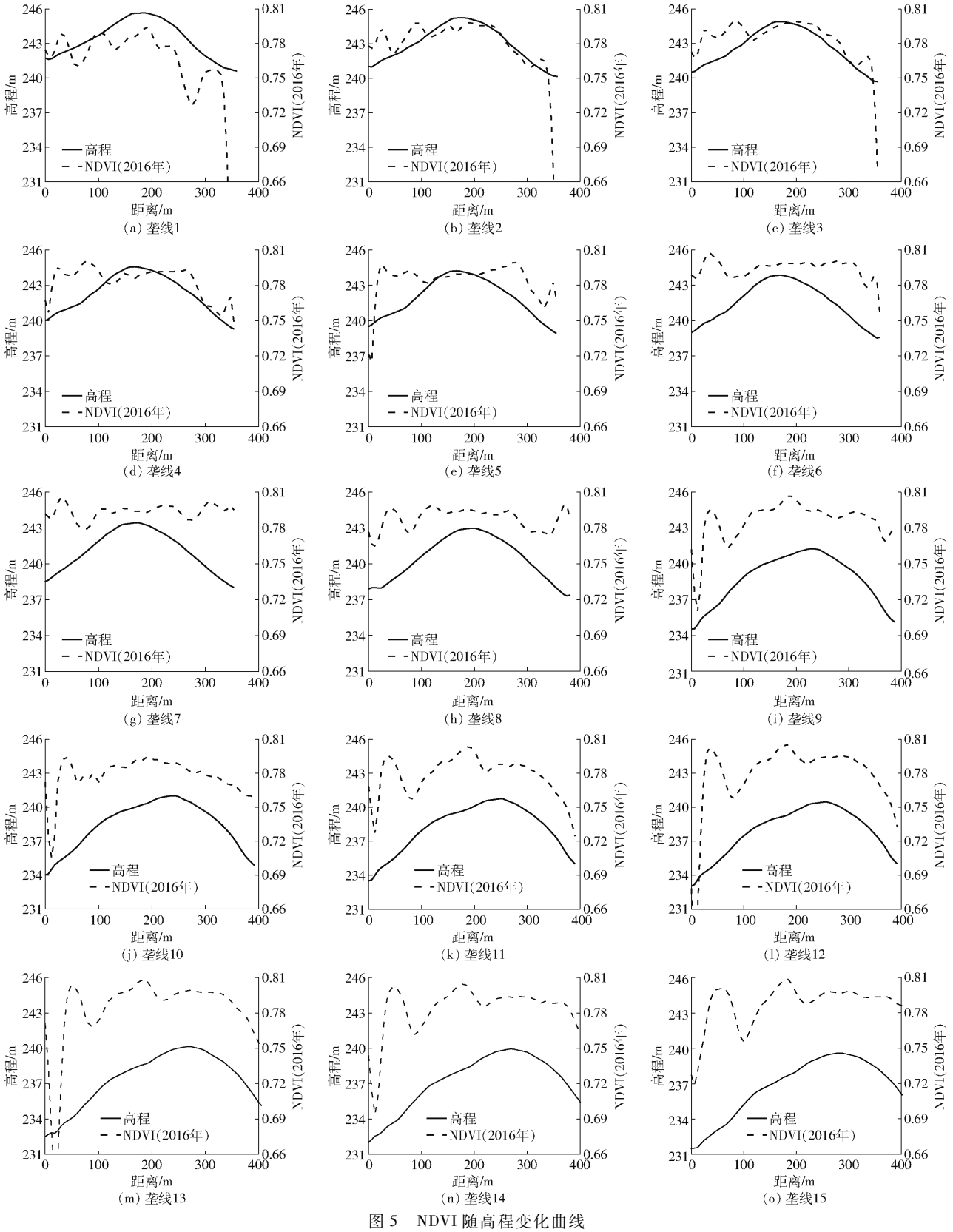


图 5　NDVI 随高程变化曲线

Fig. 5　Curves of NDVI varied with DEM

Logistic 回归的结果。

2.2.4　NDVI 极值所处位置分析

曲率可以在一定程度上反映坡面微地形变化，依据坡型位置特征将整个坡面分成 4 部分：阴坡坡底至阴坡坡腰、阴坡坡腰至坡顶、坡顶至阳坡坡腰、阳坡坡腰至阳坡坡底。每 10 个像元中选出 1 或 2 个 NDVI 的极值点并标记对应曲率，发现 NDVI 的极值（某一阶段极大值或极小值）易发生在曲率为 0 及其相邻像元位置。因此，将曲率无限接近于 0 及其邻域栅格设定为符合，由于分辨率不同，NDVI 选

表 3 阴坡 NDVI 标准差与坡型凸凹指标分析

Tab. 3 Analysis of NDVI standard deviation and slope convex index

坡型	垄线号	NDVI(2016 年)	NDVI(2018 年)	k	S/m^2	M/m	$\frac{S}{C}$/m	M/C
A	1	0.008 8	0.035 7	0.329	895.299	11.400	2.835	0.036
	2	0.007 5	0.023 8	0.343	990.057	11.953	3.194	0.039
B	3	0.007 8	0.015 9	0.379	889.690	11.723	2.865	0.038
	4	0.009 4	0.020 9	0.398	869.917	14.273	2.840	0.047
	5	0.006 4	0.015 3	0.422	979.029	16.681	3.210	0.055
	6	0.006 3	0.019 7	0.459	1 513.327	15.996	4.792	0.051
C	7	0.006 9	0.025 4	0.453	2 564.908	16.933	8.015	0.053
	8	0.007 3	0.014 7	0.463	2 801.787	16.769	8.718	0.052
D	9	0.012 4	0.041 1	0.449	8 715.351	36.617	20.856	0.084
	10	0.007 3	0.017 3	0.428	9 329.932	37.696	21.113	0.085
	11	0.012 5	0.018 9	0.425	9 974.511	39.011	21.750	0.085
	12	0.013 2	0.024 0	0.435	10 151.271	38.399	21.684	0.082
E	13	0.011 5	0.017 5	0.418	7 858.249	32.825	16.055	0.067
	14	0.013 6	0.018 9	0.407	7 935.423	30.797	16.244	0.063
	15	0.014 1	0.019 4	0.425	7 806.825	31.029	15.053	0.057

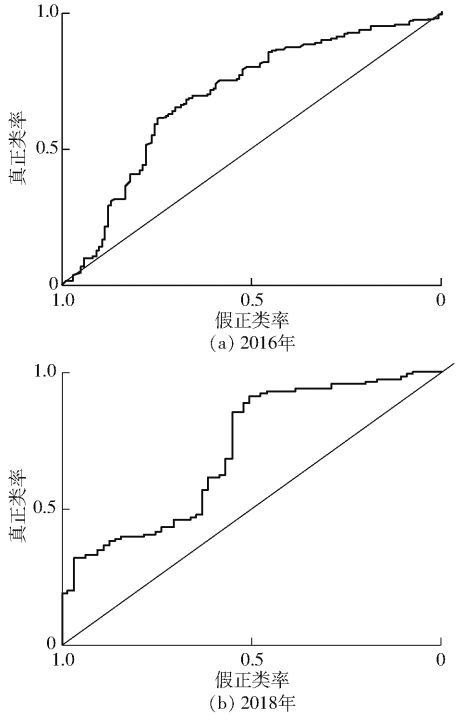


图 6 地形因子对 NDVI 模拟结果

Fig. 6 Simulation results on terrain factor and NDVI

取的个数存在差别,统计结果见表 5。由表 5 可知,2018 年 NDVI 极值的总个数约为 2016 年选取个数的 2 倍,通过对比总符合率可知,2018 年 NDVI 总符合率比 2016 年多 18.99 个百分点,像元尺度对评价结果具有较大的影响。

3 讨论

探究地形对作物长势及水肥运移的规律有助于实现精准施肥及追肥。赵越等[17]分析了泰和县耕地土壤养分空间分布及影响因素,指出地形、成土母质等结构性因素是影响土壤养分含量的关键因素;李亨伟等[18]对丘陵区微地形下的土壤有机质(Soil organic matter, SOM)的空间变异性进行了研究,将丘体划分为丘顶、丘腰上部、丘腰中部、丘腰下部、丘脚 5 种类型并对不同位置 SOM 含量进行了分析,结果表明,不同坡型下凹型坡 SOM 含量高于凸型坡,且 SOM 含量随坡度的增大而减小。由此可见,土壤养分含量的变化与地形密切相关,且地形对植被长势的影响并不随着空间尺度的减小而降低。

黑土区为我国重要的商品粮基地,确保田块内部的精细管理有助于产量的提升。因此,本研究在田块尺度上开展了不同坡型间的对比,明确微地形对作物长势的作用,为使研究成果更具鲁棒性,选取不同年份的 NDVI 综合分析,使结果在不同作物类型下适用性更广。

不同坡位的土壤侵蚀程度存在差异,地表水流输沙能力较强,下坡移动降雨的土壤侵蚀大于上坡[19],本研究区坡度在 ±0.03 范围内处于坡顶至坡肩部位,相比坡肩以下部位,该区域温度、太阳辐射较为均一,地表径流流速小,水肥保持效果好,因此作物长势好。由于高粱对微地形的敏感性较低,而研究区东侧侵蚀沟沟面较宽,沟底深,沟内几乎无作物生长,因此 NDVI 均值低,且作物长势差异性显著。在相同土地利用类型下,随着坡度的增加并大于一定范围时,土壤侵蚀显著增加[20];同时,土壤表面粗糙度作为影响水文侵蚀过程的重要因素之一,其随坡度的增加呈指数增加[21]。因此,研究区内坡

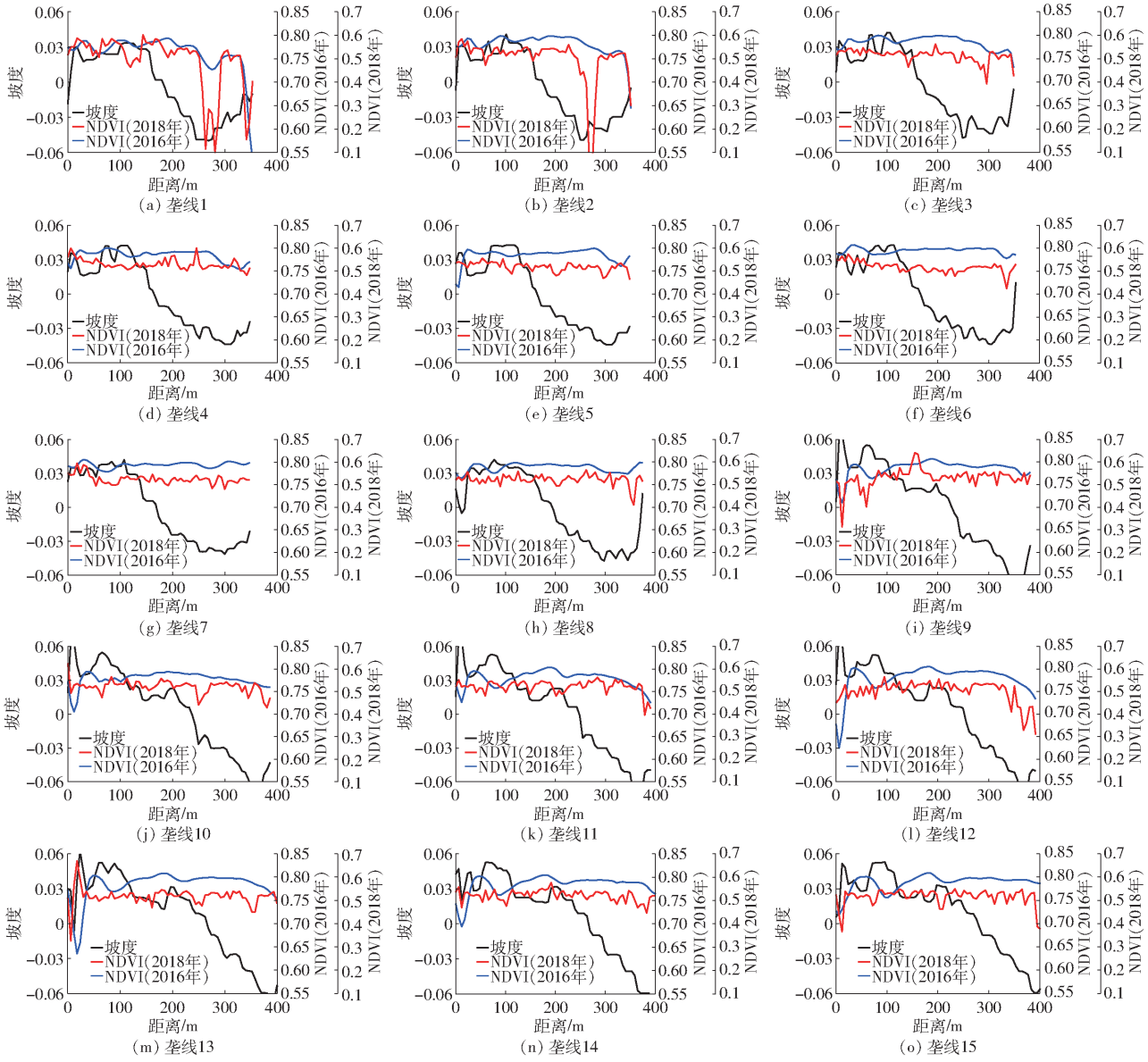


图 7　坡度与 NDVI 变化曲线

Fig. 7　Changing curves between slope and NDVI

度绝对值高于 0.04 的位置土壤表面粗糙且土壤侵蚀严重，不利于作物的生长。在进行变量施肥时，需分析地块内部坡度对植被长势的影响，对于坡度起伏较大区域进行额外的关注，有利于合理分配人力物力投入，节约管理成本。

同类研究中，不同坡型及坡度分析大多是建立在连续坡面，而微地形对于土壤养分的空间分布与作物长势造成很大的影响[22-23]。2018 年 NDVI 极值位置的总符合率高于 2016 年，与无人机影像较高分辨率有关，多项研究表明，衍生属性的质量很大程度上取决于元数据的来源、规模和分辨率，研究的“最佳”窗口与该地区滑坡的平均大小直接相关[24]，因此，较粗的单元可能无法识别最小滑坡区域[25]，由于本研究是基于田块尺度的微地形的探究，故空间分辨率越高，越有利于把握微地形对作物长势的作用。

本文对研究区内的坡型进行定义，并采用多种地形因子对 NDVI 空间变异性进行描述。同时，划定了不同坡度阈值以分析及模拟植被长势的空间变异程度，可为田块尺度内坡型的研究提供一定的思路。然而研究区内土壤类型单一，不同区域的成土母质差异明显，因此坡度阈值的选取可能不适用其他土壤类型。因此，在未来的研究中，应综合分析不同类型土壤下的空间变异特征，使该类研究能够更好地为精准农业管理提供服务。

4　结论

(1)综合考虑了坡型的形状特征及凸凹程度，对黑土区微地形坡型进行了更细致的定义。不同类坡型凸凹程度越大，NDVI 的空间变异性越大；同类

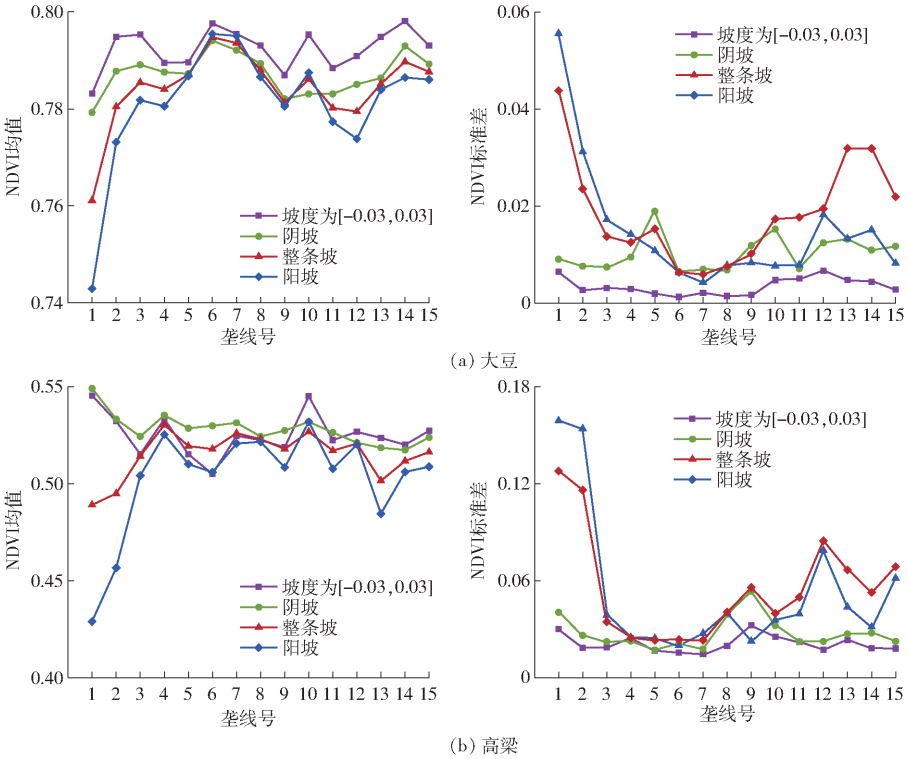


图 8 NDVI 均值、标准差与坡位的关系

Fig. 8 Relationship between NDVI mean, standard deviation and slope position

表 4 不同垄线两期 NDVI 相关系数

Tab. 4 Pearson correlation values between NDVI in two stages and different lines

	NDVI(2018 年)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
NDVI(2016 年)	0.561**	0.157	0.210	0.515**	0.413**	0.111	0.290*	0.091	0.584**	0.225	0.667**	0.513**	0.149	0.537**	0.491**

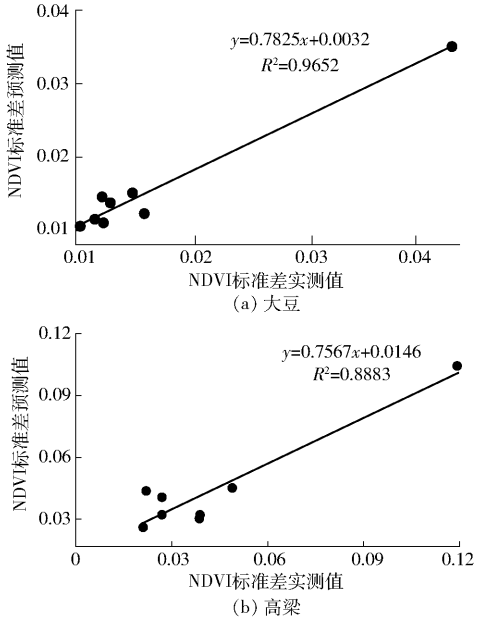


图 9 NDVI 标准差实测值与预测值关系

Fig. 9 Relationship between NDVI standard deviation measured value and predictive value

表 5 NDVI 极值位置符合设定的统计

Tab. 5 NDVI extreme position matched set statistics

NDVI	尺度/(m×m)	最大值个数	最小值个数	最大值符合个数	最小值符合个数	总符合率/%
2016 年	6.0×6.0	55	50	39	33	68.57
2018 年	3.4×3.4	113	104	103	87	87.56

坡型中 NDVI 的变化趋势一致,阴坡 NDVI 的空间变异程度与坡型凸凹程度大体呈负相关。复合坡中 NDVI 差异更为明显,这是由其特殊的坡型决定的,复合坡型中阳坡凸起与凹陷的交界处,NDVI 表现为大幅度骤减。

(2)坡度在 ±0.03 范围内的作物长势好,且空间变异性小。坡度绝对值大于 0.04 的坡度均值与其直线距离比例可以解释大豆 NDVI 决定系数0.965 2、高粱 NDVI 决定系数 0.888 3 的空间变异性。

(3)研究田块内微地形对作物长势影响显著,NDVI 的极值易出现在曲率为 0 及相邻像元处,且总符合率与元数据尺度呈正相关。

参 考 文 献

[1] ATZBERGER C. Advances in remote sensing of agriculture: context description, existing operational monitoring systems and major information needs[J]. Remote Sensing, 2013,5(2):949 - 981.

[2] LIZAGA L,GASPA L,LAURA Q. NDVI,137Cs and nutrients for tracking soil and vegetation development on glacial landforms in the Lake Parón Catchment (Cordillera Blanca,Perú)[J]. Science of the Total Environment, 2019,651(1):250 - 260.

[3] 张新乐,徐梦园,刘焕军,等. 引入地形因子的黑土区大豆干生物量遥感反演模型及验证[J]. 农业工程学报,2017,33(16):168 - 173.
ZHANG Xinle,XU Mengyuan,LIU Huanjun,et al. Remote sensing inversion models and validation of aboveground biomass in soybean with introduction of terrain factors in black soil area[J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(16): 168 - 173. (in Chinese)

[4] PIEDALLU C,CHÉRET V,DENUX J P. Soil and climate differently impact NDVI patterns according to the season and the stand type[J]. Science of the Total Environment,2019, 651(2):2874 - 2885.

[5] NIE X D,GUO W,HUANG B. Effects of soil properties,topography and landform on the understory biomass of a pine forest in a subtropical hilly region[J]. CATENA, 2019, 176:104 - 111.

[6] HART S J,VEBLEN T T. Detection of spruce beetle-induced tree mortality using high- and medium-resolution remotely sensed imagery[J]. Remote Sensing of Environment,2015,168:134 - 145.

[7] SU Z A,ZHANG J H,NIE X J. Effect of soil erosion on soil properties and crop yields on slopes in the Sichuan Basin,China[J]. Pedosphere, 2010, 20(6):736 - 746.

[8] 高志强,刘纪远. 基于遥感和 GIS 的中国植被指数变化的驱动因子分析及模型研究[J]. 气候与环境研究,2000(2):155 - 164.
GAO Zhiqiang,LIU Jiyuan. Driving factor analysis and model research of Chinese vegetation index change based on remote sensing and GIS[J]. Climatic and Environmental Research,2000(2):155 - 164. (in Chinese)

[9] 魏伟,赵军,王旭峰. 天祝高寒草原区 NDVI,DEM 与地表覆盖的空间关系[J]. 干旱区研究,2008,25(3):394 - 401.
WEI Wei,ZHAO Jun,WANG Xufeng. Spatial relationship between NDVI,DEM and surface cover in Tianzhu alpine grassland [J]. Arid Zone Research,2008,25(3):394 - 401. (in Chinese)

[10] 张少良,刘威,张兴义,等. 黑土区典型小流域土壤侵蚀空间格局模拟研究[J]. 水土保持通报,2013,33(4):224 - 227.
ZHANG Shaoliang,LIU Wei,ZHANG Xingyi,et al. Simulation of spatial pattern of soil erosion in typical small watershed of black soil region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2013,33(4):224 - 227. (in Chinese)

[11] 梁佳辉,张少良,穆林林,等. 东北典型黑土区坡面土壤速效磷空间分布规律[J]. 水土保持研究,2017,24(1):90 - 95,102.
LIANG Jiahui,ZHANG Shaoliang,MU Linlin,et al. Spatial distribution of soil available phosphorus on slope in typical black soil region of Northeast China[J]. Research of Soil and Water Conservation,2017,24(1):90 - 95,102. (in Chinese)

[12] LIU L,ZHANG K,ZHANG Z,et al. Identifying soil redistribution patterns by magnetic susceptibility on the black soil farmland in Northeast China[J]. CATENA,2015,129:103 - 111.

[13] ATTILA N,FEHÉR J,TAMÁS J. Wheat and maize yield forecasting for the Tisza river catchment using MODIS NDVI time series and reported crop statistics[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018,151:41 - 49.

[14] 王琛智,张朝,张静,等. 湖南省地形因素对水稻生产的影响[J]. 地理学报,2018,73(9):1792 - 1808.
WANG Chenzhi,ZHANG Zhao,ZHANG Jing,et al. Effects of topographic factors on rice production in Hunan Province[J]. Acta Geographica Sinica,2018,73(9):1792 - 1808. (in Chinese)

[15] ALATORRE L C,SANCHEZANDRES R,CIRUJANO S,et al. Identification of mangrove areas by remote sensing: the ROC curve technique applied to the Northwestern Mexico Coastal Zone using Landsat imagery[J]. Remote Sensing,2011,3(8): 1568 - 1583.

[16] SUN W Y,ZHU H H,GUO S. Soil organic carbon as a function of land use and topography on the Loess Plateau of China[J]. Ecological Engineering,2015,83:249 - 257.

[17] 赵越,罗志军,廖牧鑫,等. 泰和县耕地土壤养分空间分布及影响因素[J]. 水土保持学报,2018,32(5):296 - 303.
ZHAO Yue,LUO Zhijun,LIAO Muxin,et al. Spatial distribution and influencing factors of soil nutrient in the cultivated land in Tahe[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2018,32(5):296 - 303. (in Chinese)

[18] 李亨伟,胡玉福,邓良基,等. 川中丘陵区紫色土微地形下有机质空间变异特征[J]. 土壤通报,2009,40(3):552 - 554.
LI Hengwei,HU Yufu,DENG Liangji,et al. Spatial variability of organic matter under purple soil micro-topography in the hilly area of central Sichuan[J]. Chinese Journal of Soil Science,2009,40(3):552 - 554. (in Chinese)

[19] RAN Q H,WANG F,LI P. Effect of rainfall moving direction on surface flow and soil erosion processes on slopes with sealing [J]. Journal of Hydrology, 2018, 567: 478 - 488.

[20] SUN W Y,SHAO Q Q,LIU J Y. Assessing the effects of land use and topography on soil erosion on the Loess Plateau in China [J]. CATENA,2014,121:151 - 163.

[21] ZHANG G H,XIE Z F. Soil surface roughness decay under different topographic conditions[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 187:92 - 101.

[22] 刘焕军,鲍依临,徐梦园,等. 基于 SOM 和 NDVI 的黑土区精准管理分区对比[J]. 农业工程学报,2019,35(13):177 - 183.
LIU Huanjun,BAO Yilin,XU Mengyuan,et al. Comparison of precision management zoning methods in black soil area based on SOM and NDVI[J]. Transactions of the CSAE,2019,35(13):177 - 183. (in Chinese)

[23] LUO J,ZHENG Z,LI T,et al. Spatial heterogeneity of microtopography and its influence on the flow convergence of slopes under different rainfall patterns[J]. Journal of Hydrology,2017,545:88 - 99.

[24] MILLEDGED G,GRIFFITHSD V,LANES N,et al. Limits on the validity of infinite length assumptions for modelling shallow landslides[J]. Earth Surf. Process. Landf., 2012,37(11):1158 - 1166.

[25] LONG J,LIU Y L,XING S H. Effects of sampling density on interpolation accuracy for farmland soil organic matter concentration in a large region of complex topography[J]. Ecological Indicators, 2018,93:562 - 571.