

doi: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.025

黄土丘陵区浅沟表层土壤粘结力状态空间模拟*

李振炜^{1 2} 张光辉^{1 3} 耿 韧³ 王 浩³

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875)

摘要: 为探明黄土丘陵区土壤粘结力沿浅沟分布的空间差异性及其影响因素, 运用线性回归模型和状态空间方程模拟了土壤粘结力在浅沟不同部位的分布。结果表明: 沿着浅沟分水线、沟坡和沟底, 土壤粘结力呈中等程度变异, 主要受海拔高度、粘粒、砂粒含量和容重的影响; 粘结力与海拔高度、粘粒、砂粒含量、容重均存在显著的空间自相关性和较好的交互相关关系; 状态空间方程对粘结力的空间模拟效果要优于线性回归模型, 其中采用单因素粘粒含量的状态空间方程结果最好, 纳什效率系数 N_{SE} 为 0.968, 可以解释粘结力空间变异的 97.2%。

关键词: 黄土高原 土壤粘结力 浅沟 线性回归 状态空间模拟

中图分类号: S152.9; S157 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)06-0175-08

Simulation of Soil Cohesion by State-space Approach in Ephemeral Gully of Hilly Loess Plateau

Li Zhenwei^{1 2} Zhang Guanghui^{1 3} Geng Ren³ Wang Hao³

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Ephemeral gully is widespread on the hilly Loess Plateau of China. A better understanding of the spatial variability in soil cohesion across the ephemeral gully will improve understanding of ephemeral gully erosion. However, quantitative research about the spatial heterogeneity of soil cohesion is quite few. The study was conducted to investigate and predict the spatial variation of soil cohesion in an ephemeral gully of hilly Loess Plateau by using classical linear regression and state-space methodologies. The results showed that soil cohesion had a moderate variation, and it was considerably influenced by elevation, clay content, sand content and bulk density. The autocorrelation functions for above-mentioned five variables were sufficient to identify their spatial representatives. The cross-correlation functions showed a strong spatial dependence between soil cohesion and elevation, clay content, sand content and bulk density. All the derived state-space models described the spatial variation of soil cohesion better than that of the equivalent linear regression models. The best state-space models based on clay content can explain 97.2% of the soil cohesion variation. Thus, state-space model was recommended as a useful tool to predict soil cohesion in ephemeral gullies of the hilly Loess Plateau. Furthermore, the result can provide valuable data base for setting up soil erosion model.

Key words: Loess Plateau Soil cohesion Ephemeral gully Linear regression State-space model

收稿日期: 2014-08-04 修回日期: 2014-09-16

* 中国科学院“百人计划”择优支持资助项目和国家自然科学基金资助项目(41271287)

作者简介: 李振炜, 博士生, 主要从事土壤侵蚀研究, E-mail: lzw1986111@163.com

通讯作者: 张光辉, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究, E-mail: ghzhang@bnu.edu.cn

引言

土壤粘结力是指充分湿润情况下单位体积土壤抵抗外力扭剪的能力^[1],其值越大抵抗外力扭剪的能力越大,土壤抗蚀能力越强,侵蚀越微弱,反之则越剧烈,因此该指标的大小直接影响侵蚀强度^[2-3]。土壤粘结力是众多土壤侵蚀模型重要的输入参数,如 EUROSEM (European soil erosion model)^[4]和 LISEM (Limburg soil erosion model) 模型^[5]中土壤分离效率系数, KINEROS (Kinematic runoff and erosion model) 模型^[6]中输沙效率系数,以及 MMF (Morgan and Finney) 模型^[7]中坡面流土分离能力的计算都需要粘结力的输入。土壤是时空连续的变体,具有高度的空间异质性^[8-9],而粘结力作为土壤物理性质的重要指标在空间分布上必然也具有差异性,因此准确揭示粘结力的空间分布特征是建立土壤侵蚀模型的基础,同时有助于理解土壤侵蚀的空间异质性。

目前对于粘结力的空间分布以及影响因素,国内外展开了一系列的研究^[10-13]。在黄土丘陵区浅沟发育明显,浅沟侵蚀带面积可占沟间地总面积的70%,浅沟侵蚀量可占坡面总侵蚀量的35%~70%^[14-15]。浅沟侵蚀过程中,由于泥沙输移过程的分选性^[16],会造成侵蚀泥沙在浅沟不同部位的再分布,可能导致粘结力空间分布的差异性,但是关于土壤粘结力在浅沟不同部位的分布特征及其模拟还未见报道。

与传统经典统计学的线性回归模型相比,状态空间模拟方法考虑了变量的空间位置,以及不同位置上变量与其自身及其他变量之间的空间依赖关系,目前该方法在模拟土壤水分^[17]、全钾^[18]、有机碳含量^[19]、作物产量^[20-21]方面具有很好的适用性,而在土壤粘结力的状态空间模拟方面将是一个新的尝试。本文选取黄土丘陵区纸坊沟小流域发育完整的浅沟为研究对象,通过运用经典统计学的线性回归模型和状态空间方程分别对粘结力沿浅沟分水线、沟坡和沟底的分布进行模拟,并探讨土壤粘结力与其他土壤性质及地理环境的关系,以为土壤粘结力空间变异的研究积累材料,同时为土壤侵蚀过程模型的建立提供数据支持。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于安塞县纸坊沟流域(105°51'44"~109°26'18"E, 36°22'40"~36°32'16"N)。该区属黄土高原丘陵沟壑区第二副区,流域面积8.27 km²,海

拔高度在1040~1425 m之间,受基础地形和现代土壤侵蚀的影响,流域内梁峁起伏,地形破碎,沟壑密度高达8.06 km/km²。气候属于暖温带半湿润半干旱过渡区,年均气温8.8℃,年均降水量549.1 mm,降水年际变率大,且年内分配不均,7—9月份降水量占全年降水量的61.1%。流域内土壤类型较为单一,地带性黑垆土因长期遭受侵蚀,大部分已流失,目前主要土壤是在黄土母质上发育的幼年黄绵土,以及部分红胶土等。黄绵土质地均一,表层土壤类型为粉砂壤土,有机质含量低,结构疏松,土性绵软,极易被分离和输移。植被类型处于暖温带落叶阔叶林向干草原过渡的森林草原带,流域内天然森林已遭破坏,林地以刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、小叶杨(*Populus simonii*)为主,灌木以柠条(*Caragana intermedia*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)为主,草地主要为铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)等组成的处于不同演替阶段的草本植物群落。

1.2 样点布设和样品采集

在纸坊沟流域选取典型退耕刺槐林,退耕时间约为20年,郁闭度80%左右,地表覆盖有刺槐枯枝、叶子、豆荚等枯落物,由于长时间覆盖在地表,部分枯落物与土壤表层粘合在一起,从而可能对土壤表层粘结力的测定产生影响。坡面坡度为18°~30°,因长时间受降雨的侵蚀,坡面浅沟发育明显。为真实反映粘结力在浅沟不同部位的分布,按照浅沟发育特征,沿浅沟分水线、沟坡和沟底布设3条样线进行高密度采样,采样间距均为2 m,每条样线布设46个样点,总计138个采样点(图1)。由于状态空间模拟方法是在时间序列基础上发展而来,只适用于一维样带数据分析,因而将138个样点进行一维串联连接,从浅沟分水线的第一个采样点开始,到沟底最后一个采样点结束(图1)。在状态空间模拟分析中,一维样点之间的间距表示为它们的相对滞后距离,而不是实际距离。

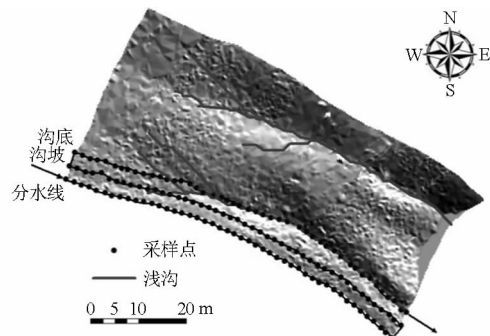


图1 采样点沿浅沟分布的一维串联连接

Fig. 1 Sampling sites with pathway used to array data for state-space analysis across ephemeral gully

粘结力的测定采用荷兰生产的微型粘聚力仪 (Durham Geo-enterprises, Inc., UK)。测定前先将地表喷湿,使地表充分湿润,然后将粘聚力仪的叶轮垂直插入土壤,顺时针扭动粘聚力仪,当扭矩足够大且达到土壤最大抗剪强度时,土壤开始转动,此时记下粘聚力仪刻度盘上的数值,反复测量 10 次取其平均值。对粘聚力可能有影响的因素中,地理环境选取海拔高度因子,土壤属性选取土壤质地、容重和有机质含量,同时还测定与表层土壤胶结的枯落物含量。由于该刺槐林下几乎无草地覆盖,因而忽略了植物根系对粘结力的影响。

使用中海达 V30 型差分 GPS(平面精度 ±5 mm,高程精度 ±20 mm)沿整个浅沟进行定点,定点间距小于 0.5 m,生成该浅沟的地形图,同时获得 138 个样点的海拔高度数据;土壤质地测定采用马尔文激光粒度仪 (Mastersizer 2000),每个样点测定 3 个重复,粘粒、粉粒、砂粒的分级采用美国制分级系统;土壤容重测定采用环刀法,测定 3 个重复取其平均值;有机质含量的测定采用重铬酸钾容量法(油浴加热),测定 3 个重复;枯落物含量测定采用直径 10 cm、高 5 cm 的大环刀,首先将土壤表面没有与土壤胶结的部分枯落物用毛刷清除,然后用大环刀进行采样,运回实验室水洗出枯落物并进行干燥称量。

1.3 分析方法

1.3.1 经典统计学

运用经典统计学中的描述统计,分析粘聚力、海拔高度、粘粒、粉粒、砂粒含量、容重、有机质及枯落物含量的最小值、最大值、平均值、方差及变异系数;用 Pearson 相关系数表达粘聚力与其影响因素间的相关性;运用线性回归模拟土壤表层粘聚力。以上统计分析均在 SPSS 18.0 中实现。

1.3.2 状态空间模拟

状态空间模拟是基于一个空间状态下的变量值,对下一个或几个空间状态下变量值进行精确估算,包括 2 个方程:状态方程和观测方程^[22]。状态空间模拟认为在位置 i 处观测的一个或一组状态向量与在位置 $i-h$ 处的状态向量具有空间相关性,当 $h=1$ 时,状态方程为

$$Z_i = \varphi Z_{i-1} + w_i \quad (1)$$

式中 Z_i ——状态向量 w_i ——模型误差
 φ ——空间转换系数矩阵

w_i 为空间位置上不相关的普通协方差矩阵,服从均值为 0、方差恒定的正态分布。空间转移矩阵 φ 和空间协方差矩阵 w_i 通过迭代回归的方法求得^[23]。观测方程为

$$Y_i = M_i Z_i + v_i \quad (2)$$

式中 Y_i ——观测向量 M_i ——观测矩阵
 v_i ——模型误差

v_i 也是一个在空间位置上不相关的普通协方差矩阵,符合均值为 0、方差恒定的正态分布,观测误差 v_i 和模型误差 w_i 是相互独立的。 Z_i 为变量的真实状态也可看作是观测向量经过平滑滤波消除“噪音”后的状态,而 Y_i 为观测向量。因此, Y_i 未必能反映系统的全部真实状态,它等于系统的真实状态再加上一个不能确定的误差,它只是系统状态的间接反映^[21]。

在进行状态空间模拟之前还要对数据进行标准化处理^[24],其转换方程为

$$x_i = \frac{X_i - (m - 2s)}{4s} \quad (3)$$

式中 x_i ——标准化处理后变量值,均值为 0.5,方差为 0.25

X_i ——标准化处理前变量值
 m ——标准化处理前变量均值
 s ——标准化处理前变量方差

土壤粘聚力与其影响因素的空间自相关分析、交互相关分析以及粘结力的状态空间模拟均在 ASTSA (Applied statistical time series analysis) 软件下进行。模型的效果评估采用决定系数 R^2 和纳什效率系数 N_{SE} 。

2 结果与分析

2.1 土壤粘聚力与其影响因素的统计特征值

土壤粘聚力、海拔高度、粘粒、粉粒、砂粒含量、容重、有机质和枯落物含量的描述性统计特征值如表 1 所示。根据 Nielsen 的标准^[25],变异系数小于 10% 为弱变异,在 10% ~ 100% 之间为中等程度变异,大于 100% 为强变异。海拔高度、粉粒含量和容重的变异系数在 1% ~ 9% 之间为弱变异;粘聚力、粘粒、砂粒、有机质和枯落物含量的变异系数在 12% ~ 56% 之间为中等程度变异。

土壤粘聚力、海拔高度、粘粒、粉粒、砂粒含量、容重、有机质和枯落物含量沿 138 个采样点的分布状况如图 2 所示。土壤粘聚力、海拔高度、粘粒含量和容重的分布状态均大体呈现一个逐渐变小、逐渐变大、逐渐变小的趋势;粉粒含量沿样带分布最为平稳,几乎呈一条直线;砂粒含量的分布与土壤粘聚力等分布趋势正好相反,为逐渐变大、逐渐变小、逐渐变大;而枯落物含量的分布比较杂乱,没有呈现规律性分布。Pearson 相关分析表明,粘聚力与海拔高度、粘粒含量和容重呈显著正相关关系,与砂粒含量呈显著负相关关系,而与粉粒和枯落物含量并没有

显著相关关系,这一结果与它们沿样带的分布情况是一致的(表1、图2)。粘粒含量越高,土壤颗粒之间的胶结能力越强,粘结力越大;粘结力与容重均可反映土壤硬化过程,二者呈显著正相关关系,这与Knapen等的研究结果是一致的^[26]。但是枯落物含

量无法很好地反映粘结力的变化,产生这种结果的原因可能是粘结力的测定深度为表层1cm,而枯落物含量的测定深度为表层5cm(与土壤胶结的部分),因而在分析枯落物对土壤粘结力影响时,枯落物含量的测定深度需要进一步合理化。

表1 浅沟表层粘结力与其影响因素的相关系数及各因素的统计特征值

Tab.1 Pearson correlation coefficients between soil cohesion and its influencing factors and statistical parameters of each variable

变量	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数	相关系数
粘结力/kPa	4.94	13.19	9.48	2.00	0.21	1.000
海拔高度/m	1 208.87	1 256.21	1 232.13	13.63	0.01	0.641**
粘粒含量/%	8.41	16.79	12.20	1.65	0.14	0.581**
粉粒含量/%	60.33	75.38	66.35	2.11	0.03	-0.068
砂粒含量/%	10.51	29.60	21.45	2.60	0.12	-0.314**
容重/(g·cm ⁻³)	0.81	1.33	1.08	0.09	0.09	0.612**
有机质含量/(g·kg ⁻¹)	4.30	23.18	11.19	3.60	0.32	-0.212
枯落物含量/(kg·m ⁻²)	0.07	0.88	0.29	0.16	0.56	-0.010

注:相关系数为粘结力与其他因素的Pearson系数,**表示P<0.01。下同。

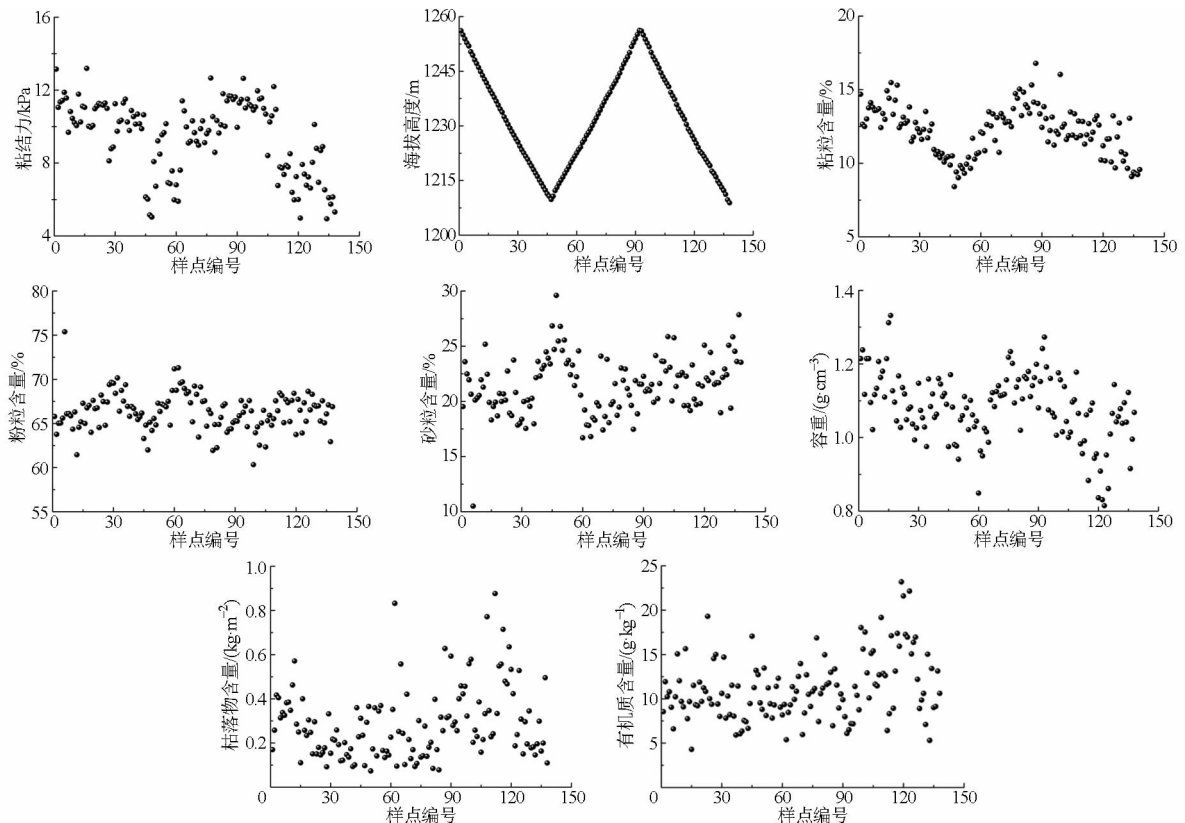


图2 土壤属性、海拔高度和枯落物含量沿样带的分布状况

Fig.2 Spatial distribution of soil properties, elevation and litter density along transect

有机质含量在一定程度上反映了土壤结构,其含量越高土壤结构越好。但是本研究发现有机质含量随138个采样点没有呈现出规律性分布(图2)。产生这种现象的可能原因:一是由于大量枯落物覆盖在地表,太阳照射时间不同以及微生物活动的差异性,使枯落物在土壤表层分解存在异质性,从而扩

大了有机质含量分布的随机性;二是由于采样点在浅沟内,浅沟不同部位侵蚀程度不同,浅沟上中部侵蚀相对严重,而下部可能会发生一部分沉积,引起了有机质含量在浅沟表层的再分布。为保证线性回归分析和状态空间模拟的顺利进行,在粘结力的影响因素中仅选择与其显著相关海拔高度、粘粒、砂粒

含量和容重。

2.2 土壤粘结力与其影响因素的自相关和交互相关分析

在进行状态空间模拟分析之前,需要保证各变量具有空间自相关性,同时确保粘结力与其影响因素之间存在交互相关关系。自相关系数显著性的界定选取 138 个样点在 95% 置信水平下的 0.167 为临界值,图 3 中用虚线表示,下同,大于此值表明变量存在显著空间自相关性,小于此值则

不存在。结果表明海拔高度的空间自相关滞后距离最大为 18 个,砂粒含量的空间自相关依赖性最低,滞后距离为 5 个(图 3),这主要是由于海拔高度沿样带的分布极其规则,砂粒含量则相对散乱,空间自相关性与变量的空间分布是密不可分的。土壤粘结力、粘粒含量和容重也具有显著的空间自相关性,其滞后距离分别为 15、14 和 11 个(图 3)。因而,5 个变量均具有显著空间自相关性,满足状态空间模拟的要求。

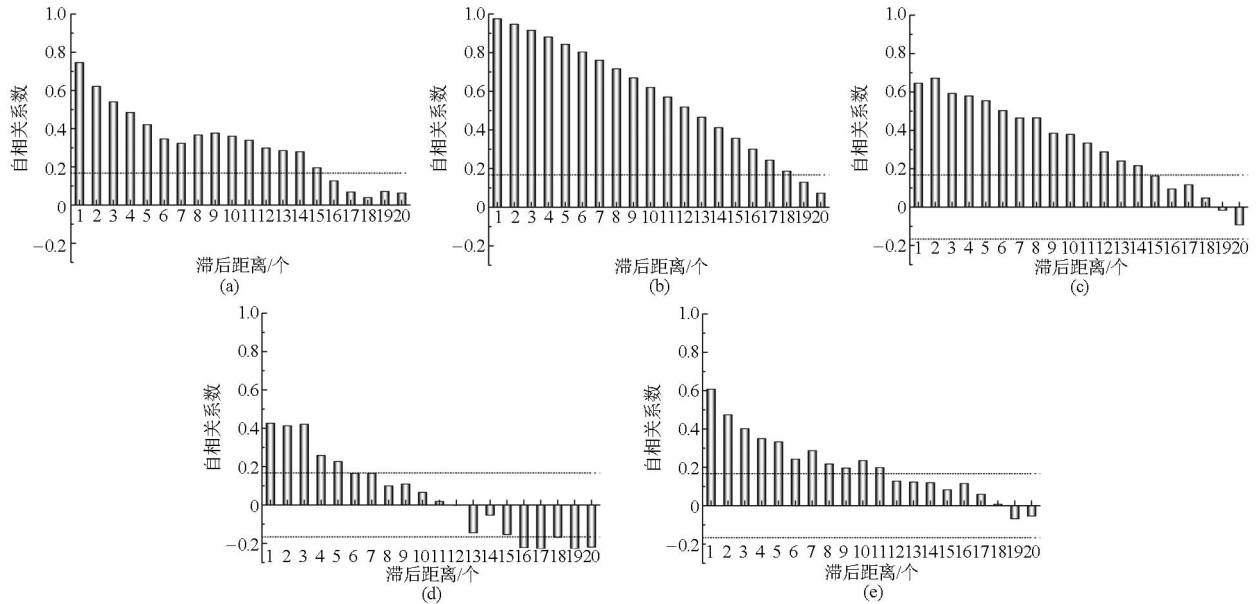


图 3 土壤粘结力、海拔高度、粘粒、砂粒含量和容重的空间自相关图

Fig.3 Autocorrelation functions for cohesion ,elevation ,clay and sand content and bulk density

(a) 粘结力 (b) 海拔高度 (c) 粘粒含量 (d) 砂粒含量 (e) 容重

交互相关分析结果表明,粘结力与海拔高度、粘粒含量和容重表现出较强的相关性,在正负方向的 10 个滞后距离范围内均显著相关;且随着滞后距离的增大,相关系数呈现逐渐减小的趋势(图 4)。贾小旭等^[17]在土壤水分及其影响因素的交互相关分析中也得到了类似结果。而粘结力与砂粒含量的交互相关性不强,虽然在负方向 10 个滞后距离下显著相关但相关系数较低,正方向上仅在 2 个滞后距离下显著相关(图 4)。满足状态空间模拟至少需要在一个滞后距离下交互相关,因而交互相关的分析结果可以保证粘结力状态空间模拟分析的实现^[27]。

2.3 土壤粘结力的状态空间模拟

空间自相关和交互相关的分析结果表明,海拔高度、粘粒、砂粒含量和容重 4 个变量均可参与粘结力的状态空间模拟。为了便于表述,分为单因素、双因素和三因素 3 个组别对粘结力状态空间模拟的效果进行分析(表 2)。在单因素的一阶状态空间方程中,使用粘粒含量效果最好,可以解释粘结力变异的 97.2%,其纳什效率系数 N_{SE} 高达

0.968;海拔高度、砂粒含量和容重的模拟效果也较好, R^2 分别为 0.952、0.936 和 0.944, N_{SE} 分别为 0.947、0.930 和 0.938。虽然砂粒含量的空间自相关性以及与粘结力的交互相关性不是很强,但是其模拟效果较好,说明状态空间模拟效果不完全取决于空间自相关性和交互相关性。纵观 4 个单因素状态空间方程,在位置 $i-1$ 处的海拔高度、粘粒、砂粒含量和容重对 i 处粘结力的变异解释并不如 $i-1$ 处粘结力本身所能解释的程度大,海拔高度、粘粒、砂粒含量和容重贡献率分别为 17.6%、26.2%、3.9% 和 2.7%,而相对应的粘结力贡献率分别为 80.1%、71.8%、94.2% 和 94.5%(表 2 状态空间方程各变量的系数)。考虑到粘粒和砂粒含量都作为土壤质地因子,因而在同一状态空间方程中不应同时出现。在双因素状态空间方程中,粘粒含量和容重对粘结力的模拟效果最好, R^2 为 0.971, N_{SE} 为 0.967。然而三因素状态空间方程效果并不优于单因素和双因素,海拔高度、砂粒含量和容重模拟效果较好,其 R^2 也仅为 0.898。

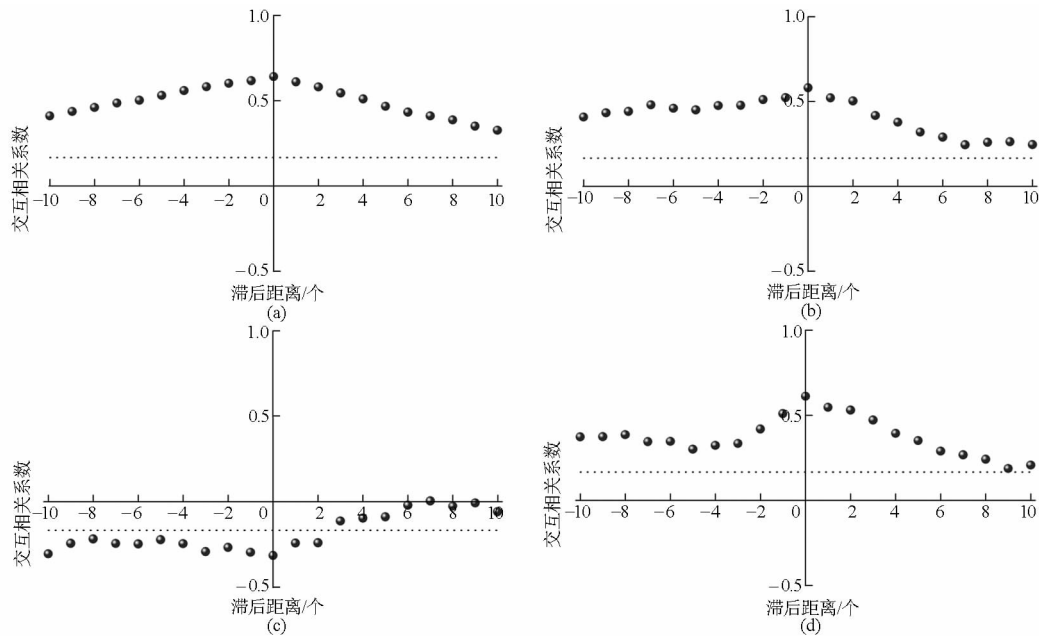


图4 土壤粘聚力与海拔高度、粘粒含量、砂粒含量、容重的交互相关图

Fig. 4 Cross-correlation functions between cohesion and elevation , clay and sand content and bulk density
(a) 粘聚力与海拔高度 (b) 粘聚力与粘粒含量 (c) 粘聚力与砂粒含量 (d) 粘聚力与容重

表2 基于海拔高度、粘粒、砂粒含量和容重不同组合下的粘聚力状态空间预测方程

Tab.2 State-space analysis for soil cohesion estimation by using different combinations of elevation , clay and sand content and bulk density

	状态空间方程	R^2	N_{SE}
单因素	$C_i = 0.801C_{i-1} + 0.176h_{i-1} + w_i$	0.952	0.947
	$C_i = 0.718C_{i-1} + 0.262W_{clayi-1} + w_i$	0.972	0.968
	$C_i = 0.942C_{i-1} + 0.039W_{sandi-1} + w_i$	0.936	0.930
	$C_i = 0.945C_{i-1} + 0.027r_{i-1} + w_i$	0.944	0.938
双因素	$C_i = 0.784C_{i-1} + 0.046h_{i-1} + 0.155r_{clayi-1} + w_i$	0.913	0.904
	$C_i = 0.778C_{i-1} + 0.179h_{i-1} + 0.023W_{sandi-1} + w_i$	0.961	0.955
	$C_i = 0.815C_{i-1} + 0.099h_{i-1} + 0.074r_{i-1} + w_i$	0.784	0.774
	$C_i = 0.711C_{i-1} + 0.268W_{clayi-1} + 0.001r_{i-1} + w_i$	0.971	0.967
	$C_i = 0.990C_{i-1} + 0.055W_{sandi-1} - 0.064r_{i-1} + w_i$	0.932	0.927
三因素	$C_i = 0.891C_{i-1} - 0.052h_{i-1} + 0.242W_{clayi-1} - 0.092r_{i-1} + w_i$	0.789	0.772
	$C_i = 0.686C_{i-1} + 0.143h_{i-1} - 0.029W_{sandi-1} + 0.180r_{i-1} + w_i$	0.898	0.895

注: C 为土壤粘聚力 h 为海拔高度, W_{clay} 为粘粒含量, W_{sand} 为粉粒含量 r 为容重 w_i 为模型误差。下同。

为了更直观地反映状态空间方程的模拟效果, 引入单因素、双因素和三因素中模拟效果最好的方程, 分别列出粘结力的实测值、预测值以及预测值95%置信区间(图5)。虽然3个方程粘聚力预测值95%置信区间均可包含其真实值, 但是单因素和双因素状态空间方程粘结力的预测值和真实值之间较为紧凑, 模拟效果略好, 同时由于单因素所选择的变量少, 因而粘粒含量作为模型输入因子具有最优的模拟效果。

2.4 状态空间模拟与线性回归模拟结果比较

运用经典统计学的线性回归分析, 将海拔高度、粘粒、砂粒含量和容重4个因素对土壤粘聚力进行线性模拟。结果表明, 单因素模拟中, 海拔高度与粘

结力的相关性最好, 其模拟效果也最好, 但其线性回归方程仅可解释粘聚力变异的41.1%, 粘粒、砂粒含量和容重的模拟效果更差, 其 R^2 分别为0.338、0.099和0.374(表3)。与状态空间模拟不同, 当有新的变量引入时, 线性回归的精度会变高, 在最多变量引入情况下(三因素), 海拔高度、粘粒含量和容重模拟效果最优, 其 R^2 和 N_{SE} 分别为0.560和0.550。

状态空间模拟效果最差的方程 R^2 为0.784, N_{SE} 为0.774, 绝大多数状态空间方程(73%)的 R^2 大于0.9, 而线性回归最优方程 R^2 和 N_{SE} 仅为0.560和0.550, 也就是说在不同因素组合下, 状态空间方程的模拟效果远优于经典统计学的线性回归模型。

(表 2、表 3)。状态空间模拟考虑了粘结力的空间位置, 以及粘结力与其自身和影响因素在不同空间位置上的依赖关系, 因而具有更高的模拟精度, 可用于黄土丘陵区浅沟表层土壤粘结力的预测。

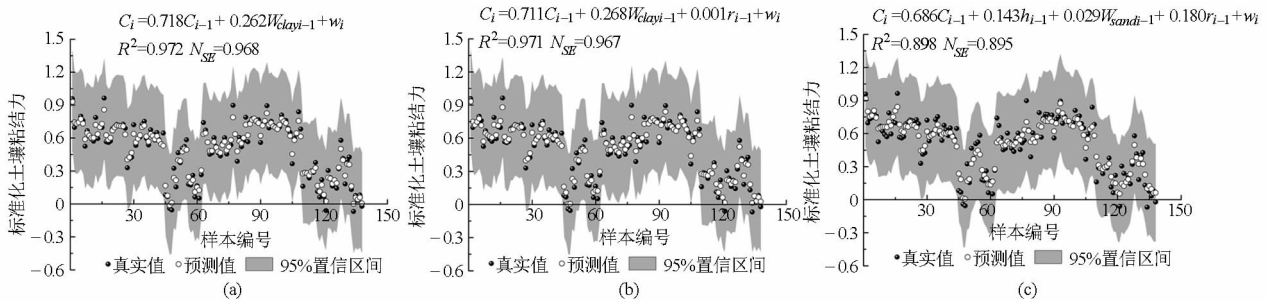


图 5 不同因素组合下标准化土壤粘结力的最优状态空间方程

Fig. 5 Best state-space models for predicting scaled soil cohesion based on different combinations of variables

(a) 单因素 (b) 双因素 (c) 三因素

表 3 基于海拔高度、粘粒、砂粒含量和容重不同组合下的粘结力线性回归预测方程

Tab. 3 Classical linear regression equations for soil cohesion estimation by using different combinations of elevation, clay and sand content, and bulk density

	经典分析线性回归方程	R^2	N_{SE}
单因素	$C = 106.462 - 0.094h$	0.411 **	0.407
	$C = 0.902 + 0.703W_{clay}$	0.338 **	0.333
	$C = 14.681 - 0.242W_{sand}$	0.099 **	0.092
	$C = -4.551 + 12.983r$	0.374 **	0.370
双因素	$C = -77.744 + 0.068h + 0.304W_{clay}$	0.442 **	0.434
	$C = -96.906 + 0.088h - 0.105W_{sand}$	0.428 **	0.420
	$C = -82.155 + 0.67h + 8.514r$	0.538 **	0.531
	$C = -7.053 + 0.494W_{clay} + 9.717r$	0.517 **	0.510
	$C = 0.154 - 0.188W_{sand} + 12.353r$	0.433 **	0.424
三因素	$C = -58.493 + 0.045h + 0.259W_{clay} + 8.241r$	0.560 **	0.550
	$C = -71.969 + 0.061h - 0.110W_{sand} + 8.572r$	0.556 **	0.547

3 结论

(1) 浅沟表层土壤粘结力呈中等程度变异, 主要受海拔高度、粘粒、砂粒含量和容重的影响, 其与海拔高度、粘粒含量和容重呈显著正相关, 与砂粒含量呈显著负相关。

(2) 土壤粘结力、海拔高度、粘粒、砂粒含量和容重均存在空间自相关性, 海拔高度的空间自相关性最好, 砂粒含量的空间依赖性最弱。粘结力与上

述 4 个影响因素间均存在显著的交互相关关系, 与海拔高度、粘粒含量和容重的交互相关系数较高, 而与砂粒含量的交互相关系数较低。

(3) 对于浅沟表层土壤粘结力的模拟, 状态空间方程的模拟结果远优于经典统计的线性回归模型, 其中包含粘粒含量的单因素状态空间方程的效果最好 ($N_{SE} = 0.968$), 可用于黄土高原浅沟发育地区表层粘结力的预测。

参 考 文 献

- 1 朱祖祥. 土壤学 [M]. 北京: 农业出版社, 1983.
- 2 Govers G, Everaert W, Poesen J, et al. A long flume study of the dynamic factors affecting the resistance of a loamy soil to concentrated flow erosion [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1990, 15(4): 313-328.
- 3 Sidorchuk A. Stochastic modelling of erosion and deposition in cohesive soils [J]. Hydrological Processes, 2005, 19(7): 1399-1417.
- 4 Morgan R P C, Quinton J N, Smith R E, et al. The European soil erosion model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1998, 23(6): 527-544.
- 5 De Roo A, Wesseling C, Ritsema C. LISEM: a single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I: theory, input and output [J]. Hydrological Processes, 1996, 10(8): 1107-1117.
- 6 Smith R E, Goodrich D C, Quinton J N. Dynamic, distributed simulation of watershed erosion: the KINEROS₂ and EUROSEM models [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995, 50(5): 517-520.
- 7 Vigiak O, Sterk G, Romanowicz R J, et al. A semi-empirical model to assess uncertainty of spatial patterns of erosion [J].

- CATENA, 2006, 66(3): 198–210.
- 8 陈翠英, 江永真, 袁朝春. 土壤特性空间变异性研究 [J]. 农业机械学报, 2005, 36(10): 121–124.
Chen Cuiying, Jiang Yongzhen, Yuan Chaochun. Study on soil property spatial variability using R language [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(10): 121–124. (in Chinese)
 - 9 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 multifractal 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)
 - 10 张光辉, 刘国彬. 黄土丘陵区小流域土壤表面特性变化规律研究 [J]. 地理科学, 2001, 21(2): 118–122.
Zhang Guanghui, Liu Guobin. Spatial and temporal variability of soil surface properties in Danangou catchment in loess hill and hilly region [J]. Scientia Geographica Sinica, 2001, 21(2): 118–122. (in Chinese)
 - 11 邱扬, 傅伯杰, 王军, 等. 黄土丘陵小流域土壤物理性质的空间变异 [J]. 地理学报, 2002, 57(5): 587–594.
Qiu Yang, Fu Bojie, Wang Jun, et al. Variability of the soil physical properties on the Loess Plateau [J]. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(5): 587–594. (in Chinese)
 - 12 赵允格, 许明祥, 王全九, 等. 黄土丘陵区退耕地生物结皮对土壤理化性状的影响 [J]. 自然资源学报, 2006, 21(3): 441–448.
Zhao Yunge, Xu Mingxiang, Wang Quanjiu, et al. Impact of biological soil crust on soil physical and chemical properties of rehabilitated grassland in hilly Loess Plateau, China [J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21(3): 441–448. (in Chinese)
 - 13 De Baets S, Torri D, Poesen J, et al. Modelling increased soil cohesion due to roots with EUROSEM [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2008, 33(13): 1948–1963.
 - 14 Gong J, Jia Y, Zhou Z, et al. An experimental study on dynamic processes of ephemeral gully erosion in loess landscapes [J]. Geomorphology, 2011, 125(1): 203–213.
 - 15 唐克丽. 中国水土保持 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
 - 16 Shi Z H, Fang N F, Wu F Z, et al. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes [J]. Journal of Hydrology, 2012, 454–455: 123–130.
 - 17 贾小旭, 邵明安, 魏孝荣, 等. 黄土高原北部草地表层土壤水分空间状态模拟 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 38–44.
Jia Xiaoxu, Shao Ming'an, Wei Xiaorong, et al. State-space simulation of soil surface water content in grassland of northern Loess Plateau [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(10): 38–44. (in Chinese)
 - 18 刘志鹏, 邵明安, 王云强. 区域尺度下黄土高原土壤全钾含量的空间模拟 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 132–140.
Liu Zhipeng, Shao Ming'an, Wang Yunqiang. Spatial simulation of soil total potassium in regional scale for Loess Plateau region [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22): 132–140. (in Chinese)
 - 19 Liu Z, Shao M, Wang Y. Estimating soil organic carbon across a large-scale region: a state-space modeling approach [J]. Soil Science, 2012, 177(10): 607–618.
 - 20 Stevenson F C, Knight J D, Wendroth O, et al. A comparison of two methods to predict the landscape-scale variation of crop yield [J]. Soil & Tillage Research, 2001, 58(3): 163–181.
 - 21 Wendroth O, Reuter H I, Christian K K. Predicting yield of barley across a landscape: a state-space modeling approach [J]. Journal of Hydrology, 2003, 272(1): 250–263.
 - 22 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
 - 23 Shumway R H, Stoffer D S. An approach to time series smoothing and forecasting using the EM algorithm [J]. Journal of Time Series Analysis, 1982, 3(4): 253–264.
 - 24 Wendroth O, Jurschik P, Kersebaum K C, et al. Identifying, understanding, and describing spatial processes in agricultural landscapes—four case studies [J]. Soil & Tillage Research, 2001, 58(3–4): 113–127.
 - 25 Nielsen D R, Bouma J. Soil spatial variability [M]. Wageningen: Pudoc Publishers, 1985.
 - 26 Knapen A, Poesen J, Govers G, et al. Resistance of soils to concentrated flow erosion: a review [J]. Earth-Science Reviews, 2007, 80(1): 75–109.
 - 27 Timm L C, Reichardt K, Oliveira J C M, et al. Sugarcane production evaluated by the state-space approach [J]. Journal of Hydrology, 2003, 272(1–4): 226–237.