



欢迎投稿 http://www.aed.org.cn

基于地理探测器和GIS的压砂地砾石空间异质性及其影响因素分析

阮晓晗,白一茹,王幼奇,高小龙

引用本文:

阮晓晗,白一茹,王幼奇,高小龙. 基于地理探测器和GIS的压砂地砾石空间异质性及其影响因素分析[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(1): 178-187.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0743

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于分层多元复合模型的广东省农田土壤有机碳高精度制图

任向宁,王璐,林赋英,陈淑莹,胡月明 农业资源与环境学报. 2021, 38(6): 967-979 https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0504

近30年唐山市生态服务价值空间分异及地理探测研究

董悦, 付梅臣, 陈乃鸽, 刘金兰 农业资源与环境学报. 2022, 39(6): 1196-1207 https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0617

山东"蓝黄"两区耕层土壤有机质的时空分异特征

李因帅,赵庚星,李涛,李建伟,窦家聪,范瑞彬 农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 891-899 https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0572

不同尺度下皎口水库水体主要指标空间变异研究

魏文娟, 毛跃军, 郝虎林, 秦伟颖, 朱莹静, 王翔, 方琳 农业资源与环境学报. 2016, 33(2): 157-163 https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0241

基于熵权-集对模型的耕地面源污染生态风险评价与防控——以新疆昌吉州为例 原伟鹏,刘新平

农业资源与环境学报. 2019, 36(5): 630-639 https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0076



关注微信公众号,获得更多资讯信息

农业资源与环境学报 2023, 40(1): 178-187

Journal of Agricultural Resources and Environment

阮晓晗,白一茹,王幼奇,等.基于地理探测器和GIS的压砂地砾石空间异质性及其影响因素分析[J].农业资源与环境学报,2023, 40(1):178-187.

RUAN X H, BAI Y R, WANG Y Q, et al. Determining the spatial heterogeneity of gravel and its influencing factors in a gravel-sand mulched field using geographical detector and GIS[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2023, 40(1): 178-187.



基于地理探测器和GIS的压砂地砾石 空间异质性及其影响因素分析

阮晓晗^{1,2},白一茹^{1,2},王幼奇^{1*},高小龙^{1,2}

(1.宁夏大学地理科学与规划学院,银川 750021;2.宁夏大学生态环境学院,银川 750021)

摘 要:为探究压砂地不同粒径砾石空间异质性及其影响因素,基于压砂地102个采样点,对不同粒径砾石配比进行了描述性统 计,通过半方差函数和全局空间自相关分析等地统计方法分析了压砂地不同粒径砾石的空间变异特征和聚集模式,并进一步利 用地理探测器模型识别影响不同粒径砾石占比空间分异的主要影响因子,在此基础之上,选取主要影响因子协同地理加权回归 克里格法对不同粒径砾石占比进行可视化,获取其分布特征。结果表明,不同粒径砾石的空间变异系数均大于10%,属中等变异。 不同粒径砾石的空间异质比变化范围较大(0.26%~83.48%),其空间异质性受随机性因素和结构性因素共同影响。空间自相关分 析显示各粒径砾石的全局 Moran's I均高于0.674,且Z值均大于1.96,表明不同粒径砾石具有极显著的空间依赖特征,呈聚集性分 布。地理探测器模型识别表明压砂地不同粒径砾石的空间分异的解释力由大到小依次为种植年限>坡向>地表粗糙度>坡度>剖 面曲率>平面曲率>地表起伏度,种植年限的单因子解释力明显高于其他因子。不同环境条件下压砂地土体中不同粒径砾石空间 分布差异明显且呈聚集性分布特征。种植年限、坡向和地表粗糙度是压砂地不同粒径砾石空间分布状况的主要影响因子。 关键词:空间异质性;地统计;空间自相关;地理探测器;地理加权回归克里格;压砂地

中图分类号:K903 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2023)01-0178-10 **doi**: 10.13254/j.jare.2021.0743

Determining the spatial heterogeneity of gravel and its influencing factors in a gravel-sand mulched field using geographical detector and GIS

RUAN Xiaohan^{1,2}, BAI Yiru^{1,2}, WANG Youqi^{1*}, GAO Xiaolong^{1,2}

(1.School of Geography and Planning, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2.School of Ecology Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: This study investigated the spatial heterogeneity of gravel with different particle sizes and the factors influencing these in gravelsand mulched fields. Based on 102 sampling points in a gravel-sand mulched field, descriptive statistics of gravel with different particle size were conducted to analyze the characteristics of the spatial variation and aggregation patterns of gravel with different particle sizes via two geostatistical methods, semi-covariance function and global spatial autocorrelation analysis. Then, the main factors influencing the spatial variation of gravel proportion were identified using a geographic probe model. The main influencing factors were then used to visualize the percentage of gravel with different particle sizes and obtain their distribution characteristics via cooperative geographically weighted regression kriging. The results showed that the spatial variation coefficients of gravel with different particle sizes were all greater than 10%, which was a moderate variation. The spatial heterogeneity ratios of the gravel size varied over a wide range (0.26%-83.48%),

收稿日期:2021-10-30 录用日期:2022-01-19

作者简介:阮晓晗(1995—),女,陕西商洛人,硕士研究生,从事土壤水分运动研究。E-mail:rxh0625@163.com

^{*}通信作者:王幼奇 E-mail:wyq0563@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41867003,41761049);宁夏自然科学基金项目(2020AAC03049);宁夏青年科技人才托举工程项目;国家重点研发计划(2018YFC1802906)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41867003,41761049); The Natural Science Foundation of Ningxia(2020AAC03049); The Youth Talent Promotion Project of Ningxia; The National Key Research and Development Program of China(2018YFC1802906)

阮晓晗,等:基于地理探测器和GIS的压砂地砾石空间异质性及其影响因素分析

indicating that their spatial heterogeneity and variability were influenced by both stochastic and structural factors. Spatial autocorrelation analysis showed that the global Moran's *I* index of gravel of each particle size was higher than 0.674 and the *Z*-values were all greater than 1.96, indicating highly significant spatial dependence characteristics for gravel of different particle sizes with aggregated distribution. The explanatory power of the spatial variance of different particle sizes in the gravel-sand mulched fields was in the order of planting year> slope aspect> surface roughness> slope> profile curvature> plane curvature> relief degree of land surface. The single factor explanatory power of planting year was significantly higher than that of the other factors. The spatial distribution of gravel with different particle sizes in the soil of the gravel-mulched field varied significantly under different environmental conditions, with the distribution appearing aggregated. The planting year, slope aspect, and surface roughness were the main factors influencing the spatial distribution of gravels of different particle sizes in gravel-sand mulched fields.

Keywords: spatial heterogeneity; geostatistics; spatial autocorrelation; geographical detector; geographically weighted regression kriging; gravel-sand mulched field

砾石是粒径≥2 mm的矿物质颗粒,在土壤中广泛 分布^[1]。研究表明,砾石类型、粒径大小、砾石配比、 形状、含量及其在土壤基质中的分布等能够显著影响 土壤物理性质^[2]、水分运动^[3]、碳储存^[4]及养分循环^[5], 并且能制约地表结皮^[6]及侵蚀^[7]等一系列土壤过程。 由于区位、气候和管理措施等不同,土体中砾石的空 间分布在自然及人为作用的综合影响下存在明显的 异质性,因此探究土体中砾石的空间分布特征能够为 合理利用土地资源、明确灌溉定额及恢复区域生态环 境提供理论依据。

近些年已有不少学者对土体中砾石的空间分布 进行了研究,如Simanton等^[8]在美国亚利桑那州东南 部的坡面研究发现,坡度梯度与地表岩石碎片含量显 著相关(P<0.01)。Poesen等¹⁹对地中海半干旱丘陵和 横断面的地表砾石进行了研究,发现砾石粒径大小和 覆盖的空间变化主要受丘陵坡度梯度控制,同时坡向 与坡位等也会显著影响砾石的空间分布(P<0.05)。 Govers 等^[10]在西班牙东南部半干旱丘陵地区研究表 明,土壤表面覆盖的砾石量不仅与坡度梯度有关,同 时与曲率线性相关。朱元骏等凹在黄土高原水蚀风 蚀交错带研究了坡面表土砾石覆盖度和粒径分布特 征,发现坡面砾石分布是侵蚀与坡度因素叠加作用的 结果。冯雪瑾等叩测定了太行山南麓地区不同坡位、 不同土层深度的砾石含量及砾石粒径的分布特征,结 果表明不同粒径砾石体积分数均呈现从坡顶到坡脚 逐渐减小的趋势。Nyssen等[13]的研究表明,耕地中砾 石的空间分布受地形地貌条件、水文过程及人为作用 共同影响。综上可知,在不同区域和尺度条件下砾石 分布均存在明显空间异质性而主要影响因素有所不 同,当前研究大多基于不同区域自然因素主导的砾石 空间异质性研究,针对人为影响较大的土体含砾石区 域研究较少,而压砂地等人为形成的特殊砾石-土壤 聚集体中砾石的空间异质性及其影响因素研究相对 缺乏。

压砂地是我国西北地区充分利用当地砾石资源, 应对于旱气候的一种典型耕作模式[14],其表面覆盖的 砾石能够有效促进土壤水分入渗、增温保墒[15]。然而 随着种植年限增加,压砂地的砾石与土壤层混合、连 通,导致其土壤理化性质¹¹⁶¹、保水保墒功能变差¹¹⁷¹,干 燥化程度加剧^{116]}。当前压砂地出现大量经长期种植 后撂荒的现象,约有1/3退化严重,近年来宁夏各地区 逐步开展压砂地有序退出及区域生态修复等工作,因 此明确压砂地不同粒径砾石空间变异特征,并进一步 分析其影响因素是研究压砂地退化机制的基础问题。 为此本研究对压砂地不同粒径砾石进行统计分析,采 用空间自相关和半方差函数的分析方法,从不同角度 揭示研究区压砂地不同粒径砾石空间结构特征和分 异规律,并通过地理探测器深入探讨种植年限、坡向 和地表粗糙度等因子对不同粒径砾石空间分异的影 响程度,选取影响因子较高的环境变量协同地理加权 回归克里格法进行插值,获取了不同粒径砾石空间分 布特征,以期为压砂地逐步退出、修复重建和分类施 策等提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于中卫市沙坡头区兴仁镇红沟(36°56′ 32″~36°57′45″N,105°22′22″~105°21′29″E),地处 宁夏中部干旱带,属干旱半干旱气候,年平均温度 6.9℃,≥10℃积温2320℃,无霜期163 d左右。多年 平均降水量不足200 mm,年蒸发量2390 mm左右,全 年日照3800 h左右,光热资源十分丰富,昼夜温差 大,土壤为灰钙土,是硒砂瓜主产区。覆盖砾石来自 香山风化碎石,覆盖厚度为20 cm左右,利用 ArcGIS 10.6制作样点分布及高程图(图1)。

1.2 采样方法

2020年9月20日至10月5日进行不同年限压砂 地砾石分选。根据前期实地调研,明确了研究区范围 内所有压砂地的种植年限,并将所有压砂地的种植年 限划分为:2、5、10、20、30 a 和 40 a。研究区总面积为 2.54 km²,种植2、5、10、20、30 a 和 40 a 的压砂地面积 占比分别为10.75%、30.42%、32.37%、14.69%、5.92% 和 5.85%。在研究区压砂地集中分布区域根据各年 限压砂地所占面积比,同时结合网格法均匀布点,样 点数分别为11、31、33、15、6和6,共计102个。在每 一个样点内选取 50 cm×50 cm范围内砾石覆盖层全 部砂石,风干后用50、31.5、25、16、10、5、2 mm筛子逐 层过筛,选取不同粒径的砾石测定质量并记录,压砂 地砾石粒径配比情况见表1。

1.3 影响因子采集与分类

砾石空间分布受自然因素与人文因素共同影响, 有研究表明土体中砾石的空间分布与地形因子之间 存在紧密联系^[8-10],地形对土体内部砾石空间变异的 影响不容忽视,这些地形因子能够通过DEM获取^[18]。 本研究以研究区DEM影像为基础,提取坡度、坡向、 地表粗糙度、地表起伏度、剖面曲率及平面曲率6种 地形因子,并通过对研究区的前期调查获取压砂地种 植年限数据,其中DEM数据为30m的ASTER GDEM 数据,来源于地理空间数据云网站。为充分考虑多因 子对砾石空间分布的影响,本文选取自然因素和人文 因素共7个影响因子,并利用自然断点法,对数值型 驱动因子进行等级划分。



图1 研究区样点分布及高程

Figure 1 Sampling point distribution and elevation of the study area

表1	压砂地	也不同粒径砾石配比	Ł(%
----	-----	-----------	----	---

Table 1	Proportion of a	gravel with	different	particle sizes	in gravel	-sand mi	lched	fields (%)
		D		000000000000000000000000000000000000000	<u>D</u>			(

种植年限 Planting year/a	>50 mm	31.5~50 mm	25~31.5 mm	16~25 mm	10~16 mm	5~10 mm	2~5 mm	≤2 mm
2	4.68±1.52a	4.56±1.38a	5.73±2.36a	8.21±1.28a	13.73±2.28a	16.79±1.28a	21.05±2.81a	25.25 ± 3.76 c
5	4.21±1.60a	4.32±1.46a	5.50±1.90a	7.77±1.92ab	11.41±1.85b	14.78±2.84a	23.71±5.05a	$28.30{\pm}3.74{\rm bc}$
10	$3.38 \pm 2.05 \mathrm{ab}$	$3.91{\pm}1.42ab$	5.04±1.77a	$7.34 \pm 1.64 \mathrm{abc}$	$11.61 \pm 1.93 \mathrm{ab}$	14.77±2.76a	24.12±5.64a	$29.83{\pm}5.53{\rm abc}$
20	2.7±1.48bc	3.41±1.18ab	4.72±1.78a	7.17±1.84abc	$11.30\pm2.55b$	14.19±2.46a	24.78±4.05a	31.73±5.22ab
30	1.68+0.55cd	$2.63 \pm 0.65 \mathrm{b}$	4.35±1.52a	$6.09 \pm 1.45 \mathrm{bc}$	12.67±1.69ab	15.91±1.98a	24.49±3.65a	32.18±4.28ab
40	0.84+0.32d	2.99±0.81b	3.61±1.58a	5.66±1.44c	12.45±3.40ab	15.66±1.66a	25.01±3.13a	33.78±8.24a

注:同列不同字母表示不同年限间差异显著(P<0.05)。

Note: Different letters in the same column indicate significant differences among planting years (P<0.05).

1.4 统计分析方法

1.4.1 空间自相关分析

空间自相关是指地理对象的某一属性值在相邻 空间位置处取值之间的相互关系,是对该属性空间聚 集或分散程度的度量^[19]。空间自相关现象广泛存在 于地理空间数据中,因此,进行空间自相关分析对深 入理解地理对象的空间分布特征具有重要意义。 Moran's/指数在地理对象的空间自相关性研究中具 有广泛应用,其不仅能在总体水平上对空间自相关现 象做出评价,而且能够对地理属性值的聚集和离散程 度作进一步的区域可视化。本研究中全局空间自相 关采用全局Moran's/指数描述:

$$I = \frac{N \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} W_{ij} \left(X_i - \overline{X} \right) \left(X_j - \overline{X} \right)}{\left(\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} W_{ij} \right) \sum_{i=1}^{N} (X_i - \overline{X})^2}$$
(1)

$$Z = \frac{1 - E(I)}{\sqrt{Var(I)}}$$
(2)

式中:N为采样点总数;W_{ij}为空间权重;X_i和X_i分别为 i处和j处的砾石含量; x为砾石含量均值; Z为标准化 统计量值; E(I)为观测变量自相关性的期望值;Var(I) 为方差。Moran's I指数的取值范围为[-1,1], I>0代 表属性值呈现空间正相关,趋于空间聚集; I<0代表属 性值呈现空间负相关,趋于空间分散; I=0代表属性值 趋于空间随机分布。采用Z值进行显著性检验, 当Z≥ 1.96或Z≤-1.96时,表示空间相关性显著(P<0.05)。 1.4.2 空间变异性分析

采用地统计学分析压砂地不同粒径砾石占比的 空间变异特征,其公式为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)^2]$$
(3)

式中: $\gamma(h)$ 代表半方差函数值;N(h)代表相距为h的 点对数; $Z(x_i)$ 代表 $x=x_i$ 处变量Z的实测值; $Z(x_i+h)$ 代 表 $x=x_i+h$ 处变量Z的实测值。以滞后距h为横轴、半 方差函数值为纵轴可以绘制半方差图。根据半方差 图可以得到块金值(C_0)、基台值(C_0+C)、变程(A)三个 重要特征值。 C_0 表示随机部分引起的空间变异性; C_0+C 表示变量的最大变异程度;A表示变程,即变量 自相关范围。通过公式 $C_0/(C_0+C)$ 可以计算得到一个 描述空间变量依赖性的重要指标,即空间异质比,根 据 Cambardella 等^[20]的划分标准, $C_0/(C_0+C)$ <25%表示 强的空间依赖性, $25\% < C_0/(C_0+C) < 75\%$ 表示中等空 间依赖性, $C_0/(C_0+C) > 75\%$ 表示弱的空间依赖性。

1.4.3 地理探测器

地理探测器是探测空间分异并揭示某种地理属 性与其解释因子之间关系的一种空间分析模型^[21],能 够探测单因子对因变量空间分异的影响,并对其显著 性进行统计学检验。本研究采用因子探测功能来分 析各影响因子对压砂地土体中不同粒径砾石空间分 异的影响。其计算公式^[22]如下:

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^{L}N_{h}\sigma_{h}^{2}}{N\sigma^{2}}$$
(4)

式中: N_h 为子类型区h的单元数;L为变量的分层; N为全区的单元数; σ_h^2 为不同粒径砾石占比在子类型 h区的方差; σ^2 为不同粒径砾石占比在全区的方差。 q值为某因子对不同粒径砾石空间分异的解释程 度,其取值范围为[0,1],值越大表示该因子对不同粒 径砾石空间分异的解释力越强,反之则越弱。

1.4.4 地理加权回归克里格法

地理加权回归克里格法(GWRK)是通过对目标变 量和辅助变量进行地理加权回归拟合(GWR),得到局 部回归的残差项,然后使用普通克里格插值法(OK)对 所得残差项进行插值^[23]。GWR模型结构如下:

$$Y_{\rm GWR}(s_0) = \beta_0(s_0) + \sum_{i=1}^{k} \beta_i(s_0) X_k(s_0)$$
(5)

式中: $Y_{GWR}(s_0)$ 为因变量 $Y 在 s_0$ 处的模拟值; $\beta_0(s_0)$ 为截 距项; $\beta_i(s_0)$ 为第k个协变量的回归系数; $X_k(s_0)$ 为第i个样点上第k个变量的测量值; s_0 为局部估计的系数, 用加权最小二乘法求得,是空间位置的函数,其权重 矩阵的估计采用高斯函数;k为自变量数。

GWRK法是用OK法对GWR模型拟合后的残差进行插值,该方法是对GWR法的一种深入推广,并增加了GWR法拟合的趋势^[24],其表达式为:

$$Y_{\rm GWR}(s_0) = \beta_0(s_0) + \sum_{i=1}^k \beta_i(s_0) X_k(s_0) + \varepsilon(s_0)$$
 (6)

式中: ε(s₀)为GWR模型在点 s₀处拟合后所得的残差, 采用OK法进行插值。

1.4.5 精度评价

随机生成的80个用于模型拟合的测试点参与所 有分析过程,其余22个测试点用于验证空间插值结 果。用验证点估计值和实测值的平均相对误差 (*MRE*)和均方根误差(*RMSE*)评价不同方法的预测准 确性。

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \frac{\left| \hat{y}_{i} - y_{i} \right|}{y_{i}}$$
(7)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (\hat{y_i} - y_i)^2}$$
(8)

式中: $\hat{y_i}$ 是在i处不同粒径砾石占比的估计值; y_i 是在i处不同粒径砾石占比的实测值;n为验证点个数,在 本研究中n=22。当MRE和RMSE接近于0时,插值精 度较高。

1.5 数据处理

利用 SPSS 20.0 进行经典统计分析,在GS+9.0 软件中完成半方差函数分析,运用 GeoDa 1.16 软件进行 全局空间自相关分析,在 GeoDetector 中完成地理探 测器的影响因子分析,在GWR 4.0 中完成GWR分析, 用 ArcGIS 10.6 软件分别对研究区不同粒径砾石进行 GWRK 插值,常规统计分析和绘图处理分别在 Excel 2016 和 Origin 2017 中进行。

2 结果与讨论

2.1 砾石粒径占比的描述性统计

表2是压砂地102个采样点砾石覆盖层砾石粒径 占比的描述性统计特征值,各样点砾石粒径>50、 31.5~50、25~31.5、16~25、10~16、5~10、2~5 mm 和≤2 mm 平均占比分别为3.40%、3.98%、4.76%、7.33%、 11.56%、15.09%、22.36%和31.52%。经典统计学通 常用变异系数(CV)的大小描述变量的变异程度,当 CV<10%时为弱变异,当10%<CV<100%时为中等变 异,当CV>100%时为强变异^[25]。表2结果表明砾石粒 径占比的变异程度随粒径的减小逐渐减小,>50mm 砾石CV最大,为59.62%,<2mm砾石CV最小,为 19.82%,所有粒径砾石占比均属中等变异,说明不同 粒径砾石含量受随机性因素和结构性因素共同影响。 通过K-S检验可发现Q>50、5~10mm和<2mm粒径砾 石属正态分布,其余5个粒径范围的砾石均不符合正 态分布,说明不同粒径砾石含量受人为干扰较大。为 满足地统计分析要求,对不符合正态分布的粒径进行 对数正态转换,使其符合正态分布。

2.2 基于地统计学的不同粒径砾石空间变异特征

在GS+9.0中对压砂地不同粒径砾石占比进行半 方差函数模型拟合,结果如表3所示。参照半方差函 数理论模型的选取标准(决定系数R²接近于1、残差 RSS 趋近于0),发现粒径>50、31.5~50、25~31.5、16~ 25、10~16、5~10、2~5 mm 和<2 mm 的砾石含量适宜的 模型分别为指数模型、线性模型、纯块金模型、指数模 型、线性模型、高斯模型、线性模型、球型模型。砾石 的空间变异性受结构性因素和随机性因素的共同影 响,结构性因素(砾石母质、地形等)会导致空间相关

表2 不同粒径砾石占比的描述性统计

项目 Item	>50 mm	31.5~50 mm	25~31.5 mm	16~25 mm	10~16 mm	5~10 mm	2~5 mm	≤2 mm
最大值 Max	10.93%	7.53%	9.99%	14.22%	18.01%	22.70%	37.16%	45.54%
最小值 Min	0.37%	1.06%	1.69%	2.94%	7.49%	7.49%	12.44%	18.63%
平均值 Mean	3.40%	3.98%	4.76%	7.33%	11.56%	15.09%	22.36%	31.52%
标准差 Standard deviation	0.020%	0.016%	0.020%	0.019%	0.024%	0.030%	0.056%	0.062%
变异系数 CV	59.62%	40.78%	42.49%	25.99%	20.71%	20.08%	25.22%	19.82%
偏度 Skewness	1.096	0.161	0.738	0.529	0.684	0.020	0.404	0.199
峰度 Kurtosis	1.719	-0.880	-0.303	1.039	-0.043	-0.354	-0.792	-0.662
分布类型 Type of distribution	正态	对数正态	对数正态	对数正态	对数正态	正态	对数正态	正态

Table 2 Descriptive statistics of gravel proportion with different particle size

表3 压砂地不同粒径砾石占比的半方差模型参数

Table 3 Semivariance model parameters of gravel proportion with different particle size in gravel-sand mulched field

砾石粒径 Gravel size/mm	模型 Model	变程 Range/m	块金值 Nugget	基台值 Sill	块金值/基台值 (Nugget/Sill)/%	决定系数 R ²	残差 RSS
>50	指数模型	44.00	0.040 0	0.415 0	9.64	0.45	1.18×10 ⁻²
31.5~50	线性模型	9.00	0.000 1	0.000 3	17.86	0.56	7.54×10 ⁻⁹
25~31.5	纯块金模型	—	0.311 5	0.311 5	—	—	—
16~25	指数模型	240.00	0.000 1	0.000 4	14.59	0.54	1.91×10 ⁻⁸
10~16	线性模型	1 300.44	0.034 7	0.041 6	83.48	0.34	1.85×10 ⁻⁴
5~10	高斯模型	133.17	0.000 1	0.000 9	13.60	0.68	1.05×10 ⁻⁷
2~5	线性模型	1 300.44	0.064 1	0.077 0	83.29	0.14	1.37×10 ⁻³
≤2	球型模型	156.00	0.000 0	0.003 8	0.26	0.79	8.10×10 ⁻⁷

性增强,随机性因素(耕作制度、种植年限等)使砾石 空间相关性减弱^[26]。在8个粒径砾石中2~5、10~16 mm的砾石空间异质比均大于75%,说明其受随机性 因素影响剧烈;25~31.5 mm的最佳模型为纯块金模 型,说明其空间上呈随机性分布;其余粒径的空间异 质比均小于25%,说明结构性因素是空间分布的主导 因素。变程结果显示10~16、2~5 mm粒径的变程均 远大于平均采样间距(250 m),说明相较于其他粒径 砾石,10~16、2~5 mm砾石的空间连续性的尺度范围 更大。

2.3 Moran's I指数

图 2 为通过 GeoDa 软件获取的不同粒径砾石全 局 Moran 散点图,全局 Moran's I 指数为 Moran 散点图 的斜率。对压砂地不同粒径砾石进行全局空间自相 关分析发现,砾石粒径范围为>50、31.5~50、25~31.5、 16~25、10~16、5~10、2~5 mm 和≤2 mm 的全局 Moran's I指数分别为0.892、0.717、0.928、0.924、0.923、0.674、 0.944 和 0.779, 各粒径砾石的全局 Moran's I 值均高于 0.674, P均小于0.01, 表明压砂地不同粒径砾石均表现 出很强的空间正相关,且Z值均大于1.96,表示空间相 关性显著,说明样点与周围样点的值相似。在Moran 散点图中,数据处在第一、第三象限表示正的空间自相 关性,数据处于第二、第四象限表示负的空间自相关 性。由图2可知,各粒径砾石的散点分布状况不同,但 整体均主要分布在第一、第三象限,说明其在空间分布 上并非完全随机,而是具有极显著的空间依赖特征,即 各粒径砾石在空间上呈显著聚集性。

2.4 压砂地不同粒径砾石空间分异的因素识别

本研究利用地理探测器的因子探测器得到种植 年限、坡度、坡向、地表粗糙度、地表起伏度、剖面曲率 及平面曲率7个可能影响压砂地不同粒径砾石空间 分异因素的q值并对其进行了排序(表4),各个因子 的解释力均通过了1%的显著性水平检验。对各因 子的平均q值综合分析可知,影响压砂地不同粒径砾 石空间分异的因子按影响大小依次为种植年限>坡 向>地表粗糙度>坡度>剖面曲率>平面曲率>地表起 伏度。

2.5 压砂地不同粒径砾石的空间分布特征及精度评价

GWR模型通过计算回归模型的局部参数来消除 地理数据中存在的空间自相关性及空间非平稳性问 题,克服了回归模型中不同空间位置的环境因子权重 一致的不足,实现了局部空间信息的捕获,提高了插 值精度,同时其在空间制图方面表现出更丰富的局部 细节和更光滑的空间渐变特征^[27],因此可以更加直观 揭示出压砂地砾石配比的空间分布特征。

本研究在地理探测器识别压砂地不同粒径砾石 空间分异因子的基础上,选取q值最高的三个因子 (种植年限、坡向和地表粗糙度)作为GWR模型的环 境变量,并通过地理加权回归克里格法(GWRK)插值 获取研究区压砂地砾石分布图(图3)。<2 mm的砾石 占比高值主要集中于研究区中部,西南部含量较低。 2~5 mm砾石占比高值区和低值区均呈破碎化、分散 化分布。5~10 mm和10~16 mm砾石占比分布呈现相 似的分布格局,高值均分布于东北部,低值集中分布 于中部;16~25 mm砾石占比高值区主要分布于西部 和西南部,低值区主要集中于东北部;25~31.5 mm砾 石占比高值主要分布于西南部,东北部有零散分布, 低值主要分布于中部;31.5~50 mm砾石占比的低值主 要分布于东北部,其余部分均有明显高值分布;>50 mm砾石占比主要集中分布于中部、西部及南部。

本研究通过计算 22 个验证点的 MRE 和 RMSE 来检验的 GWRK 的插值精度,评价结果如表5所示。 >50、31.5~50、25~31.5、16~25、10~16、5~10、2~5 mm 和<2 mm 粒径砾石占比的 MRE 和 RMSE 均趋近于0, 说明引入种植年限、坡向和地表粗糙度三个影响因子 的 GWRK 模型能够较为精准地模拟压砂地不同粒径 砾石的空间分布状况,同时也可以验证种植年限、坡 向和地表粗糙度为压砂地不同粒径砾石的主要影响 因子。

2.6 不同粒径砾石占比的空间分布规律的成因分析

地统计分析表明不同粒径砾石的空间异质性受随机性因素和结构性因素共同影响,通过地理探测器进一步分析发现,种植年限、坡向、地表粗糙度、坡度、 剖面曲率、平面曲率、地表起伏度均对砾石占比的空间分布产生不同程度的影响。

随种植年限增加,压砂地砾石层中大粒径砾石占 比逐渐降低而小粒径砾石占比逐渐提高。相关研究 表明影响砾石分布的原因主要有地表径流、风蚀风化 及人为活动干扰^[13,28],研究区处于干旱半干旱带,降 雨稀缺,自然条件下难以形成地表径流,因此仅有小 粒径砾石和细土可能在农业灌溉作用下向下迁移。 风蚀风化作用对不同粒径砾石的分布有显著影响,坡 向会影响太阳辐射的强度和时间,地表粗糙度表示地 表对风速和风沙活动的影响,坡度、剖面曲率、平面曲 率和地表起伏度均反映了区域微地形状况,均可影响 砾石的风蚀风化进程^[29],导致不同位置的砾石在流





水、风力及重力等外营力作用下砾石的空间分布有所 差异。一些学者研究表明,坡度是砾石分布的重要影 响因子^[8-10],压砂地不同粒径砾石空间分异的主导因 素识别表明,本研究中坡度对不同粒径砾石分布的作 用相对较弱,这主要是由于压砂地一般选取地表平 整、地表起伏度较小的区域进行铺砂及后续农业耕 作,因此研究区内各样点的坡度、剖面曲率、平面曲率 和地表起伏度变化较小,对于砾石分布的影响相对较 低。坡向的q值高于其他几个地形因子,这是因为研 究区地貌类型为黄土丘陵,区内沟壑纵横,虽然压砂

阮晓晗,等:基于地理探测器和GIS的压砂地砾石空间异质性及其影响因素分析

表4 压砂地不同粒径砾石占比空间分异的因子探测结果

Table 4 Factor detection results of spatial differentiation of gravel proportion with different particle size in gravel-sand mulched fields

田乙	>50	mm	31.5~	50 mm	25~31	l.5 mm	16~2	5 mm	10~1	6 mm	5~10	mm	2~5	mm	≤2 1	mm	q平均值	总排序
Factor	q	排序 Rank	Average q	General rank														
种植年限 Planting year	0.310	1	0.018	4	0.201	1	0.071	1	0.167	1	0.034	2	0.115	1	0.169	1	0.136	1
坡度 Slope	0.045	5	0.070	1	0.048	6	0.019	6	0.095	2	0.012	5	0.015	7	0.013	5	0.040	4
坡向 Slope aspect	0.074	2	0.018	5	0.127	2	0.017	7	0.053	3	0.012	6	0.046	4	0.004	7	0.044	2
地表粗糙度 Surface roughness	0.068	3	0.056	2	0.051	5	0.024	4	0.008	6	0.040	1	0.047	3	0.049	2	0.043	3
地表起伏度 Relief degree of land surface	0.027	7	0.003	7	0.077	3	0.023	5	0.036	4	0.010	7	0.021	5	0.009	6	0.026	7
剖面曲率 Profile curvature	0.039	6	0.022	3	0.029	7	0.026	2	0.003	7	0.022	3	0.085	2	0.045	3	0.034	5
平面曲率 Plane curvature	0.045	4	0.014	6	0.074	4	0.025	3	0.035	5	0.018	4	0.018	6	0.021	4	0.031	6

表5 GWRK精度评价

Table 5 Accuracy evaluation of GWRK

评价指标 Evaluating indicator	>50 mm	31.5~50 mm	25~31.5 mm	16~25 mm	10~16 mm	5~10 mm	2~5 mm	≤2 mm
RMSE	0.026	0.015	0.019	0.025	0.021	0.033	0.052	0.058
MRE	0.036	0.007	0.011	0.006	0.003	0.007	0.013	0.012

地所处位置一般为坡底,但其坡向存在差异,因此研究区内各样点所处位置的坡向成为影响侵蚀和风化的重要因子,对砾石的空间分布产生较大作用。种植年限的q值明显高于其他因子,说明不同粒径砾石的空间异质性受种植年限影响更为显著。这可能是由于种植年限增加,耕作过程中机械碾压和耖砂翻耕会加速砾石由大粒径向小粒径转化的过程,导致出现种植年限越大砾石破碎化越明显,以及土体中小粒径砾石占比提高的现象,谭军利等¹³⁰¹也发现随着砂田种植年限延长,压砂地大粒径的砾石量减少,小粒径的砾石增多。

本研究从多个角度分析了压砂地土体中不同粒 径砾石的空间分异及其影响因素,但不同因子的具体 作用仍有待进一步探究。同时有必要针对不同种植 年限压砂地土壤理化性质、土壤水分运动及溶质运移 状况开展进一步研究,以期为实现压砂地农业可持续 发展、恢复区域生态功能提供理论支撑。

3 结论

(1)不同粒径砾石空间变异系数为19.82%~59.62%,属中等变异,其空间变异性受随机性因素和结构性因素共同影响。

(2)不同粒径砾石占比的空间分布状况不同,各 粒径砾石的全局 Moran's I值均高于0.674,并全部通 过极显著性检验(P<0.01),表明在全局尺度上压砂地 不同粒径砾石均表现出很强空间正相关,即均存在极 显著的空间依赖特征,且呈聚集性分布。

(3) 压砂地不同粒径砾石空间分异的解释力由大 到小依次为种植年限>坡向>地表粗糙度>坡度>剖面 曲率>平面曲率>地表起伏度,种植年限、坡向和地表 粗糙度为砾石空间分异的主要影响因子。

参考文献:

- POESEN J, LAVEE H. Rock fragments in top soils: Significance and processes[J]. Catena, 1994, 23(1/2):1–28.
- [2] EPSTEIN E G, GRANT W J, STRUCHTEMEYER R A. Effects of stones on runoff, erosion, and soil moisture1[J]. Soil Science Society of America Journal, 1966, 30(5):638–640.
- [3] 詹振芝,黄炎和,蒋芳市,等.砾石含量及粒径对崩岗崩积体渗透特性的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):85-90,95. ZHAN Z Z, HUANG Y H, JIANG F S, et al. Effects of content and size of gravel on soil permeability of the colluvial deposit in Benggang[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(3):85-90,95.
- [4] PATTON N R, LOHSE K A, SEYFRIED M, et al. Lithology and coarse fraction adjusted bulk density estimates for determining total organic carbon stocks in dryland soils[J]. *Geoderma*, 2019, 377:844-852.
- [5] LAI X M, ZHU Q, CASTELLANO M J. Soil rock fragments: Unquanti-

农业资源与环境学报·第40卷·第1期



Figure 3 Spatial distribution of gravel proportion with different particle size

http://www.aed.org.cn

阮晓晗,等:基于地理探测器和GIS的压砂地砾石空间异质性及其影响因素分析

fied players in terrestrial carbon and nitrogen cycles[J]. Geoderma, 2022, 406:115530.

- [6] POESEN J. Surface sealing as influenced by slope angle and position of simulated stones in the top layer of loose sediments[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 11(1):1–10.
- [7] 赵满,王文龙,郭明明,等.不同砾石含量塿土堆积体坡面侵蚀特征研究[J].土壤学报,2020,57(5):1166-1176. ZHAO M, WANG W L, GUO M M, et al. Erosion of slopes of Lou soil stacks different in gravel content[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5):1166-1176.
- [8] SIMANTON J R, RENARD K G, CHRISTIANSEN C M, et al. Spatial distribution of surface rock fragments along catenas in semiarid Arizona and Nevada, USA[J]. *Catena*, 1994, 23(1/2):29–42.
- [9] POESEN J W, WESEMAEL B V, BUNTE K, et al. Variation of rock fragment cover and size along semiarid hillslopes: A case-study from southeast Spain[J]. *Geomorphology*, 1998, 23(2/3/4):323-335.
- [10] GOVERS G, OOST K V, POESEN J. Responses of a semi-arid landscape to human disturbance: A simulation study of the interaction between rock fragment cover, soil erosion and land use change[J]. *Geoderma*, 2006, 133(1/2):19-31.
- [11] 朱元骏, 邵明安. 黄土高原水蚀风蚀交错带小流域坡面表土砾石 空间分布[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 2008, 38(3):375-383.
 ZHU Y J, SHAO M A. Spatial distribution of soil gravel on slope surface of small watershed in water wind erosion interlaced zone of Loess Plateau[J]. Scientia Sinica(Terrae), 2008, 38(3):375-383.
- [12] 冯雪瑾, 张志华, 杨喜田, 等. 砾石在太行山南麓土壤中的分布特征[J]. 河南农业大学学报, 2019, 53(4):608-615. FENG X J, ZHANG Z H, YANG X T, et al. Distribution characteristics of rock fragments on south foot of Taihang Mountain[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2019, 53(4):608-615.
- [13] NYSSEN J, POESEN J, MOEYERSONS J, et al. Spatial distribution of rock fragments in cultivated soils in northern Ethiopia as affected by lateral and vertical displacement processes[J]. *Geomorphology*, 2002, 43(1/2):1-16.
- [14] 白一茹, 王幼奇, 王菲, 等. 压砂地土壤导水特性空间格局及影响 因子[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(4):55-61. BAI Y R, WANG Y Q, WANG F, et al. Spatial variability of soil saturated hydraulic conductivity and its influencing factors in the gravel mulched field of Ningxia[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34 (4):55-61.
- [15] 白一茹,赵云鹏,王幼奇,等.宁夏砂田不同砾石覆盖厚度土壤入 渗过程及模型分析[J].水土保持学报,2017,31(4):81-85. BAI Y R, ZHAO Y P, WANG Y Q, et al. Soil infiltration process and model analysis of field mulched with different thickness of gravel-sand in Ningxia[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(4):81-85.
- [16] 赵云鹏, 白一茹, 陆学娥, 等. 宁夏不同种植年限下硒砂瓜土壤干燥化效应研究[J]. 水土保持研究, 2019, 26(1):273-279. ZHAO Y P, BAI Y R, LU X E, et al. Effects of different growth years of watermelon on soil desiccation in gravel-sand mulched field in Ningxia[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(1):273-279.
- [17] 王超, 王菲, 吴秀玲, 等. 压砂年限对土壤质量的影响研究[J]. 干旱 区资源与环境, 2015, 29(8):190-195. WANG C, WANG F, WU X L, et al. Research on evolvement of soil quality on gravel mulched field[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29 (8):190-195.

- [18] VOS C, DON A, PRIETZ R, et al. Field-based soil-texture estimates could replace laboratory analysis[J]. *Geoderma*, 2016, 267:215–219.
- [19] 罗耀文,任周鹏,葛咏,等.基于 PCA-GWR 方法的村级贫困时空格局及致贫因素分析[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(2):231-245. LUO Y W, REN Z P, GE Y, et al. Analysis on spatio-temporal patterns and drivers of poverty at village level based on PCA-GWR
 [J]. Journal of Geo-information Science, 2020, 22(2):231-245.
- [20] CAMBARDELLA C A, MOORMAN T B, NOVAK J M, et al. Fieldscale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(5):1501–1511.
- [21] 王琪, 王永生, 杜国明, 等. 基于人地关系的干旱区耕地流转空间 分异特征与驱动机制的地理探测[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(2):241-248. WANG Q, WANG Y S, DU G M, et al. Geographical exploration of spatial differentiation characteristics and driving mechanism of cultivated land circulation in arid regions based on human-land relationships[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021, 38(2):241-248.
- [22] WANG J F, ZHANG T L, FU B J. A measure of spatial stratified heterogeneity[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 67:250–256.
- [23] GUO L, MA Z H, ZHANG L J. Comparison of bandwidth selection in application of geographically weighted regression: A case study[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2008, 38(9):2526–2534.
- [24] 夏子书, 白一茹, 包维斌, 等. 基于多光谱和地理加权回归模型的 石嘴山城市土壤有机碳空间分布研究[J]. 干旱区地理, 2020, 43 (5):1348-1357. XIA Z S, BAI Y R, BAO W B, et al. Spatial distribution of soil organic carbon in Shizuishan based on multispectral and geographically weighted regression model[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(5):1348-1357.
- [25] NIELSEN D R, BOUMA J. Soil spatial variability[M]. Florida: CRC Press, 1985:2-30.
- [26] 解文艳,周怀平,杨振兴,等.黄土高原东部潇河流域农田土壤有 机质时空变异及影响因素[J].农业资源与环境学报,2019,36(1): 96-104. XIE W Y, ZHOU H P, YANG Z X, et al. The spatial-temporal variation of soil organic matter and its influencing factors in Xiaohe River basin in eastern Loess Plateau, China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2019, 36(1):96-104.
- [27] 王幼奇,张兴,赵云鹏,等.基于GIS和地理加权回归的砂田土壤 阳离子交换量空间预测[J].土壤,2020,52(2):421-426. WANG Y Q, ZHANG X, ZHAO Y P, et al. Interpolation of soil CEC of sandy fields using GIS and Geographically Weighted Regression-Kriging[J]. Soils, 2020, 52(2):421-426.
- [28] 许海超. 耕作引起的紫色泥岩破碎对坡面水文过程的影响[D]. 成都:中国科学院大学, 2020:18-20. XU H C. Effects of bedrock fragmentation induced by hoeing into purple mudstone on hydrological processes of hillslopes[D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences, 2020:18-20.
- [29] HEIMSATH A M, DIBIASE R A, WHIPPLE K X. Soil production limits and the transition to bedrock-dominated landscapes[J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5:210–214.
- [30] 谭军利,王西娜,田军仓,等. 压砂地砂层持水特性研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(2):319-325. TAN J L, WANG X N, TIAN J C, et al. Water retention characteristics of gravel-sand stratum on the gravel-sand mulched field[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(2): 319-325.