

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2023.03.07

引用格式: 王献,鲁敏,侯红星,等. 山区平原过渡区土质地表基质空间异质性特征分析——以河北省易县东部地区为例[J]. 中国地质调查,2023,10(3): 60–66. (Wang X, Lu M, Hou H X, et al. Analysis of spatial heterogeneity of soil substrate in mountainous plain transition area: A case study of Eastern Yi County of Hebei Province [J]. Geological Survey of China,2023,10(3): 60–66.)

山区平原过渡区土质地表基质空间异质性特征分析 ——以河北省易县东部地区为例

王 献, 鲁 敏, 侯红星, 孙 肖, 王浩浩, 乔衍溢, 刘 勇

(中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心, 河北 廊坊 065000)

摘要:当前地表基质调查工作刚刚起步,多个环节处于探索阶段,其中查清土质地表基质类型及其分布是地表基质调查工作中的一项基本任务。通过对河北省易县东部的山区平原过渡地区开展土质地表基质调查,从分析土质地表基质质地组分(砂粒、黏粒)的空间异质性入手,运用经典统计学和地统计学方法,确定砂粒和黏粒的含量为中等程度的变异,拟合的最优半变异函数模型均为球面模型,在相应变程(7 km)内具有中等程度的空间自相关性,进而确定了研究区最合理的采样网度为 $6.5\text{ km}^2/\text{点}$ 。分别对砂粒和黏粒组分进行克里金插值,得到研究区土质地表基质的分布格局,总结出土质地表基质的空间异质性特征及规律为:受高程、坡度、距河流距离等地形因素的影响,偏砂质的土质地表基质出现在高程低、坡度缓、距离河流近的区域;偏黏质的土质地表基质出现在高程大、坡度陡、远离河流的山区。该研究为土质地表基质调查的工作部署和成果表达提供了基础资料。

关键词: 地表基质; 质地组分; 空间异质性; 半变异函数; 地形

中图分类号: P681.7

文献标志码: A

文章编号: 2095–8706(2023)03–0060–07

0 引言

在特定的研究区域内,相同时间、不同空间下土质地表基质的差异性被称为土质地表基质的空间异质性。了解土质地表基质的空间异质性对于准确描述和科学预测土质地表基质的空间分布具有重要的指导意义。

当前地表基质调查工作刚刚起步,围绕着土质地表基质的相关研究多为调查方法^[1–3]、地表基质分类^[4]、调查要素指标的选取^[5]等,尚未有针对土质地表基质空间异质性特征方面的研究。土质地表基质与土壤学中“土壤质地”的概念有一定的相似性^[6–7]。前人研究表明土壤的空间异质性是土壤的重要属性之一^[8],分析土质地表基质的空间异质性,是合理确定调查网度,准确掌握土质地表基质分布规律并查清其分布状况的需要。

根据《地表基质分类方案(试行)》^[6],识别土质中的粗骨土可以通过肉眼及经验大致判断,识

别砂土、壤土及黏土则需要确定粒径小于 2 mm 的砂粒、黏粒的含量。因此研究土质地表基质的空间异质性及其影响因素可从分析砂粒和黏粒着手。

河北省易县东部地区地处太行山东麓、华北平原西部,为山区平原过渡地区,有多条河流穿过,地形复杂,地貌类型丰富,地表基质类型出露全面,是研究土质地表基质空间异质性、分析土质类型影响因素的理想区域。本文从地形角度出发,选取高程、坡度、距河流距离等因素,运用经典统计学和地统计学方法定性描述这些因素对土质地表基质类型的影响,旨在为深入分析土质地表基质的分布特征及影响因素提供参考。

1 研究区概况

研究区位于河北省保定市易县东部地区,面积约 800 km^2 ,横跨易县、涞水县和定兴县,地处太行山区向华北平原过渡的倾斜地带,发育地层主要为

蓟县系高于庄组、雾迷山组、洪水庄组,青白口系下马岭组、景儿峪组,以及寒武系馒头组、毛庄组、张夏组(图1),岩性主要为灰岩、白云岩、页岩等,海拔17~992 m,地势由西向东下降明显,流水落差

大,研究区内有北易水、中易水、瀑河穿过,属温带季风气候区,土壤类型以潮土、粗骨土、褐土为主,分布有少量石质土,平原区的土地利用以耕地为主,山区以草地及低矮灌木林地为主^[9]。

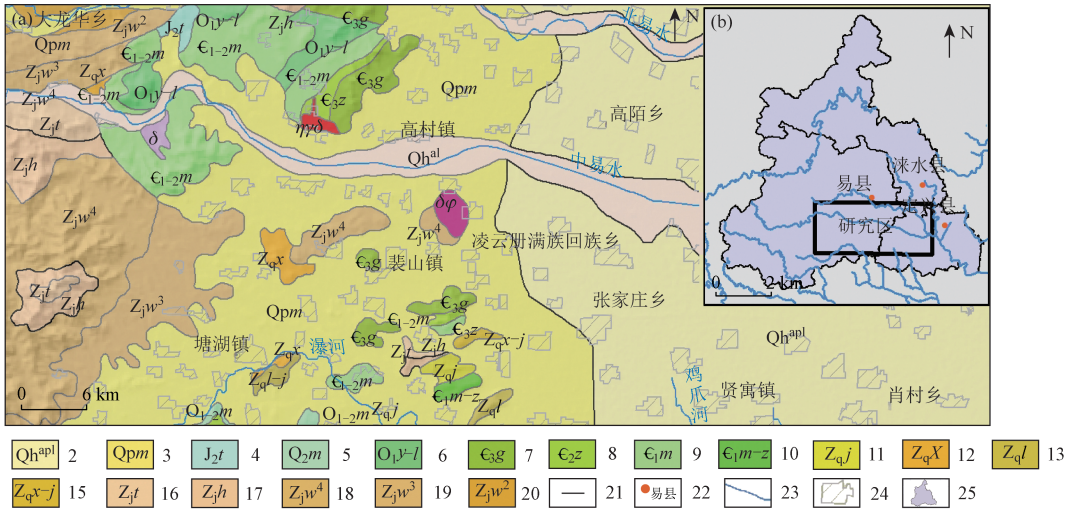


图1 研究区地质简图(a)与地理位置(b)^[10]
Fig.1 Geological sketch (a) and location (b) of the study area^[10]

2 研究方法

2.1 土壤采样及分析方法

研究区主要为农用地,在兼顾代表性和均匀性的原则上,每约4 km²设置一个取样点,取样半径不超过2 km,共布设212个调查点,每个

点由相距50 m 范围内的3个样品充分混合而成,均为采自0~20 cm 的表层样品,样品按照《LY/T 1225—1999 森林土壤颗粒组成(机械组成)的测定》^[11]的标准进行质地组分含量测定。同时将样品采集过程中记录的GPS坐标利用ArcGIS软件转为具有空间坐标的空间点,制作采样点位分布图(图2)。

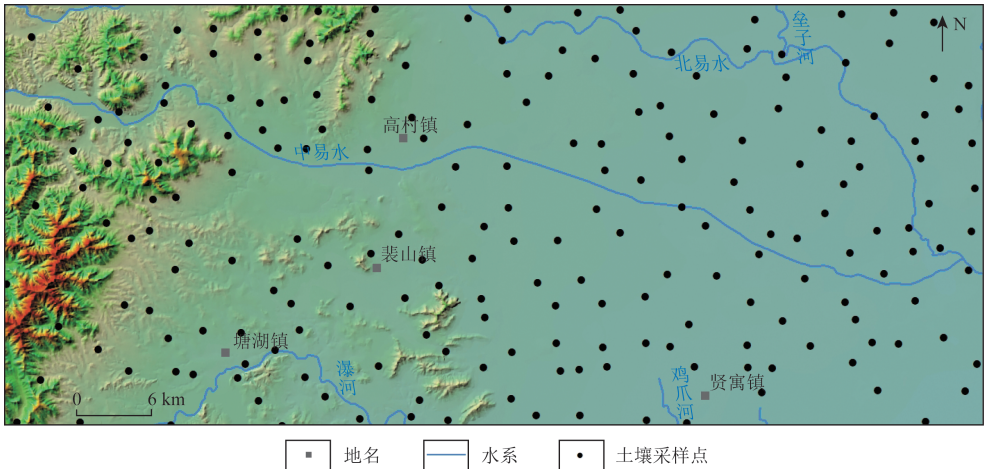


图2 研究区土地表基质采样点位分布
Fig.2 Distribution of soil ground substrate sampling points in the study area

2.2 数据处理

2.2.1 经典统计学

对土质地表基质质地组分含量的经典统计学分析包括砂粒、黏粒含量的平均值、方差、最大值、最小值、变异系数(I_{cv})及数据的 K-S 正态分布检验。变异系数大小可反映特征变量的空间变异程度, $I_{cv} \leq 0.1$ 为弱变异, $0.1 < I_{cv} < 1.0$ 为中等程度变异, $I_{cv} \geq 1.0$ 为强变异^[12-13],数据分析使用 SPSS 软件。

2.2.2 地统计学

采用半变异函数对土质地表基质的质地组分含量进行空间异质性特征分析,通过半变异函数值随样点滞后距增加而变化的散点图,在软件 GS + 9.0 中对散点图采取不同的数学理论模型进行拟合,根据决定系数(R^2)判断散点图最适合的模型。模型拟合能获取块金值(C_0)、基台值($C_0 + C$)和变程(A_0)3 个用于评价土质粒度空间变异程度的参数^[14]。其中,变程反映了变量空间自相关范围的大小,在变程之内变量具有空间自相关性,因此变程提供了研究某种属性相似范围的一种测度^[15];块金值和基台值受自身因素和测量单位的影响较大,不能用于比较不同变量间的随机变异,但块金效应值($C_0/(C_0 + C)$)体现了变量的空间依赖性,是衡量区域化随机变量空间变异程度的重要指标^[16-17]。一般认为 $C_0/(C_0 + C) < 0.25$ 时,变量具有强烈的空间自相关性; $C_0/(C_0 + C)$ 为 $0.25 \sim 0.75$ 时,变量具有中等程度的空间自相关性; $C_0/(C_0 + C) > 0.75$ 时,空间自相关性较弱^[17]。

为获取土质质地组分含量的空间分布特征,进而获取土质地表基质的空间分布特征,根据模型类型、块金值、基台值及变程,结合采样点位置,在 ArcGIS 10.7 中采用克里金插值法分别对研究区土质组分含量进行空间插值,同时采用交叉验证法对插值结果进行评价,得到均方根误差 (root mean square error, RMSE)^[18] 为

$$F_{RMSE} = \sqrt{\sum_i^n (S_{oi} - S_{ei})^2 / n} \quad (1)$$

式中: F_{RMSE} 为某土质组分含量的均方根误差; n 为

用于插值的采样点个数; S_{oi} 和 S_{ei} 分别表示第 i 个采样点位置上土质地表基质质地组分含量的实际值和预测值。半变异函数拟合采用 GS + Version 9 软件处理,空间插值和交叉验证采用 ArcGIS 10.7 软件处理。

3 研究区土质地表基质特征

3.1 组分含量

对研究区 212 个样点数据进行经典统计学分析(表 1),可以看出砂粒和黏粒的含量均为中等程度变异,K-S 正态分布检验表明,研究区土质地表基质的质地组分含量仅符合变换后的正态分布。

表 1 土质质地组分含量描述性统计特征
Tab.1 Descriptive statistical characteristics of soil texture component content

	统计参数/%				变异系数 (I_{cv})
	最小值	最大值	平均值	方差	
砂粒	5.5	91.2	27.3	15.8	57.6
黏粒	0.8	54.0	17.6	7.3	41.6

由于经典统计学分析只能在一定程度上反映样本总体,不能准确反映质地组分含量的随机性、结构性、独立性与相关性^[14]。因此需要进一步采用地统计学方法分析和探讨质地组分含量的空间变异结构^[19]。

3.2 空间异质性

基于半变异函数的分析可知,研究区土质地表基质的质地组分含量的空间变异特征最适合用球面模型来描述,模型拟合度高(表 2,图 3);砂粒、黏粒的块金效应值均在 $0.25 \sim 0.75$ 之间,说明两者呈中等程度的空间相关,说明研究区内的砂粒和黏粒含量不仅受到成土母质、地形等非人为因素的影响,还受到了人类活动等主观扰动的影响;砂粒、黏粒的变程分别为 7.17 km、6.96 km,变程的绝对值较大,说明在研究区域内砂粒、黏粒均呈大块状分布,在较大范围内具有渐变性。此外约 7 km 的变程对应的采样网度约为 $6.5 \text{ km}^2/\text{点}$,大于本次研究样本的采样网度 $4 \text{ km}^2/\text{点}$,说明本次采样密度下的分析测试结果能够反映土质组分的空间变异特征,且本地区最为合理的调查点网度为 $6.5 \text{ km}^2/\text{点}$ 。

表 2 土质质地组分含量半变异函数模型及参数

Tab.2 Semi - variogram model and parameters of soil texture component content

类型	数据变换类型	最适模型	块金值 (C_0)	基台值($C + C_0$)	块金效应值 ($C_0/(C + C_0)$)	变程(A_0)	决定系数 (R^2)	均方根误差 (F_{RSME})
砂粒	对数 $\lg(x)$	球面模型	0.016	0.044	0.633	7 170.0	0.960	13.48
黏粒	BOX - COX($\lambda = 0.652\ 9$)	球面模型	3.260	7.082	0.540	6 960.0	0.932	6.50

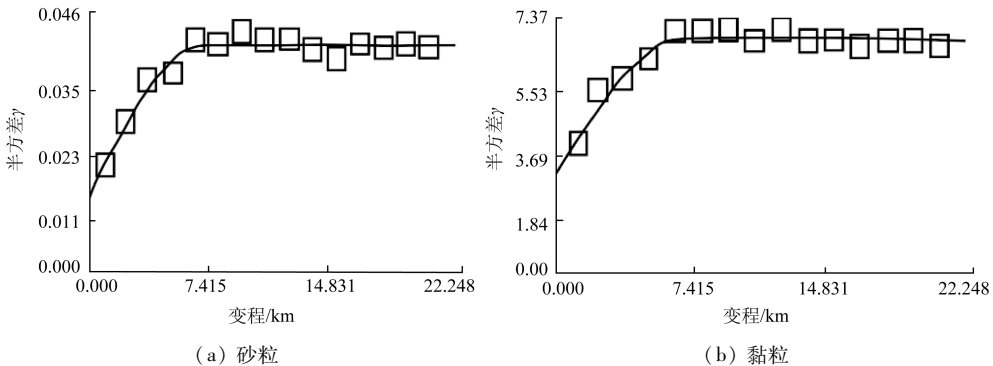


图 3 砂粒和黏粒在球面模型下的半变异函数曲线

Fig.3 Semi - variogram curve under spherical model of sand and clay

3.3 空间分布格局

利用克里金插值法得到研究区土质地表基质质地组分含量的空间分布格局(图 4,图 5)。砂粒的高值沿中易水河方向近对称分布,且越接近河道含量

越高,低值分布在西部和西南部山区,分布范围与山区大致重合,且极低值出现在高程下降缓慢的山坡(图 4);黏粒的含量分布与砂粒相反,高值分布在西部和西南部山区,低值分布于中易水河及其沿岸(图 5)。

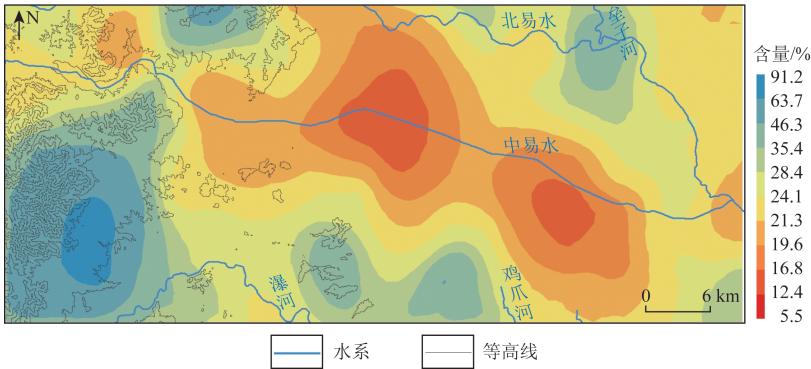


图 4 研究区砂粒空间分布格局

Fig.4 Spatial distribution pattern of sand particles in the study area

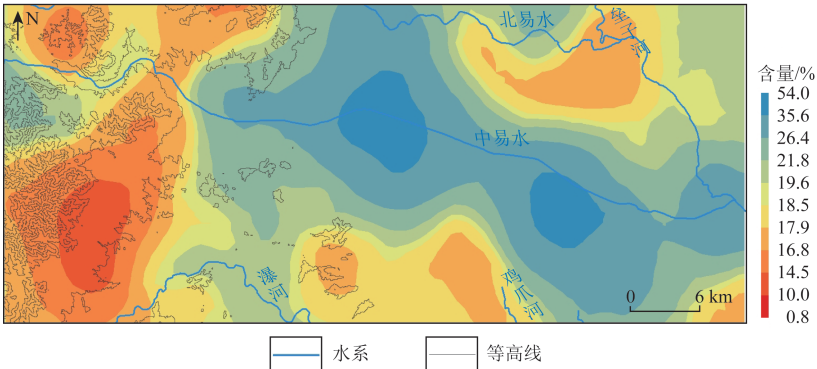


图 5 研究区黏粒空间分布格局

Fig.5 Spatial distribution pattern of clay particles in the study area

3.4 土质地表基质的空间分布格局

根据侯红星等^[2]提出的自然资源地表基质“五级三类”分类方案,将2种土质质地组分的克里金插值图叠加,得到研究区土质地表基质空间分布格局(图6)。

分析发现,壤土为研究区主要的土质地表基质类型,在研究区呈大块状分布,砂质壤土呈SE向带状分布于海拔相对较低的中易水河岸,黏质壤土仅在研究区西南部山区出现,且集中在坡度较陡的山坡位置。

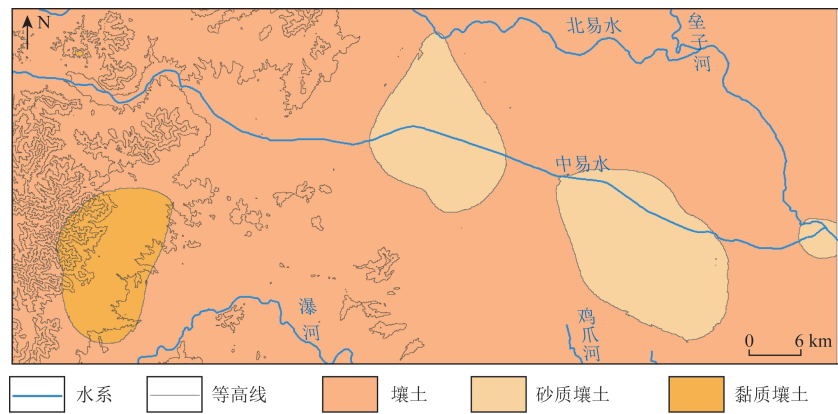


图6 研究区土质地表基质空间分布格局

Fig.6 Spatial distribution pattern of soil surface substrate in the study area

3.5 土质地表基质类型的影响因素

在地形复杂的地区,土壤空间异质性明显受到地形因子的影响^[14]。在地形因子中选择海拔、坡度、距河流距离作为变量,利用经典统计学方法分别对砂粒和黏粒含量进行分析。样点高程值从实际调查过程中获取,坡度通过处理分辨率为25 m的DEM数据获得,距河流距离指从样点到中易水河的距离,因研究区内另外2条河规模较小,忽略其对样点质地的影响。坡度、距河流距离的获得在ArcGIS 10.7中处理完成。

将3个变量按照值的大小分为3个区间,分别统计砂粒、黏粒在对应区间内含量的平均值(表3),通过对比发现,随高程的增加砂粒含量呈递减趋势,黏粒含量呈递增趋势;随坡度的增加,砂粒含量呈递减趋势,黏粒含量呈递增趋势;随距河流距离的增加,砂粒含量呈递减趋势,黏粒含量呈递增趋势。

砂粒、黏粒是直接决定土质地表基质类型的质地组分,因此偏砂质类型的基质出现在高程低、坡度缓、距离河流近的区域;偏黏质类型的基质出现在高程大、坡度陡、远离河流的山区,这与克里金插值(图4,图5)的结果是吻合的。

表3 不同变量下砂粒和黏粒的统计特征

Tab.3 Characteristics of sand and clay particles under different variables

变量	样点数量/个	砂粒平均值/%	黏粒平均值/%
低高程((0, 50] m)	120	30.53	15.99
中高程((50, 100] m)	53	25.98	17.55
高高程(> 100 m)	39	19.39	22.64
小坡度([0°, 2°])	163	29.47	16.35
中坡度((2°, 6°])	38	21.83	20.07
大坡度((6°, 16°])	11	14.86	27.73
距河流近距离([0, 2 000] m)	38	37.81	13.41
距河流中距离((2 000, 4 000] m)	42	32.64	15.54
距河流远距离(> 4 000 m)	132	22.64	19.47

4 讨论

易县东部地区土质地表基质的质地组分存在空间变异,砂粒的变异程度高于黏粒,这可能与砂粒粒径相对较大,不易发生搬运,会在河流及沿岸等水流冲击明显的地区聚集,使砂粒含量的最大值远高于黏粒,造成砂粒的变异系数更大,河流发育地区的地表基质类型较为丰富。研究区位于村庄分布密集、人口密度相对较大的地区,样品采集于受人工改造影响较大的表层,这可能是适宜农业生产的壤土大块分布的原因之一。

虽然地形因素中高程、坡度、距河流距离等能够在一定程度上解释土质地表基质类型的空间变异,但成土母质、植被类型、外界干扰等因素对土质地表基质类型的影响还有待于进一步研究。

5 结论

(1)确定了易县东部地区的土质地表基质在空间上存在中等程度的空间自相关性,并基于最优拟合半变异函数模型对砂粒、黏粒含量分别插值,得到了区域土质地表基质的空间分布,为地表基质调查成果图件的编制提供了参考。

(2)通过对土质地表基质组分的半变异函数模型拟合,确定了最优模型下的变程约为7 km,进而确定了本区域最合理的调查点网度为6.5 km²,为下一步地表基质调查工作的开展奠定了基础。

参考文献(References):

[1] 侯红星,张蜀冀,孙肖,等. 自然资源地表基质调查工程2020—2022年实施方案[R]. 廊坊:中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心,2020.
Hou H X, Zhang S J, Sun X, et al. 2020—2022 Implementation Plan of the Natural Resources Ground Substrate Survey Project[R]. Langfang: Langfang Center for General Survey of Natural Resources, China Geological Survey, 2020.

[2] 侯红星,张蜀冀,鲁敏,等. 自然资源地表基基层调查技术方法新经验——以保定地区地表基基层调查为例[J]. 西北地质, 2021, 54(3): 277—288.
Hou H X, Zhang S J, Lu M, et al. Technology and method of the ground substrate layer survey of natural resources: Taking Baoding area as an example[J]. Northwestern Geology, 2021, 54(3): 277—288.

[3] 于俊博,周传芳,梁中恺,等. 重要生态功能区土壤化学元素的空间分布模式——以大兴安岭松岭区为例[J]. 中国地质调查, 2021, 8(6): 105—113.
Yu J B, Zhou C F, Liang Z K, et al. Spatial distribution patterns of soil chemical elements in important ecological function areas: A case study in Songling area of the Greater Khingan Mountains[J]. Geological Survey of China, 2021, 8(6): 105—113.

[4] 殷志强,秦小光,张蜀冀,等. 地表基质分类及调查初步研究[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(6): 8—14.
Yin Z Q, Qin X G, Zhang S J, et al. Preliminary study on classification and investigation of surface substrate[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(6): 8—14.

[5] 侯红星,葛良胜,孙肖,等. 地表基质调查内容及要素—属性指标体系探讨[J]. 自然科学, 2021, 9(4): 433—442.
Hou H X, Ge L S, Sun X, et al. Discussion on the contents of

ground substrate investigation and the index system of elements and attributes[J]. Open Journal of Natural Science, 2021, 9(4): 433—442.

[6] 自然资源部. 自然资源部办公厅关于印发《地表基质分类方案(试行)》的通知[EB/OL]. (2020—12—22). http://gi.mnr.gov.cn/202012/t20201222_2596025.html.
Ministry of Natural Resources. Notice of the general office of the ministry of natural resources on issuing the ground substrate classification scheme (trial)[EB/OL]. (2020—12—22). http://gi.mnr.gov.cn/202012/t20201222_2596025.html.

[7] 吴克宁,赵瑞. 土壤质地分类及其在我国应用探讨[J]. 土壤学报, 2019, 56(1): 227—241.
Wu K N, Zhao R. Soil texture classification and its application in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(1): 227—241.

[8] 王政权,王庆成. 森林土壤物理性质的空间异质性研究[J]. 生态学报, 2000, 20(6): 945—950.
Wang Z Q, Wang Q C. The spatial heterogeneity of soil physical properties in forests[J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(6): 945—950.

[9] 鲁敏,侯红星,王献,等. 河北省保定地区自然资源地表基基层试点调查2020年实施方案[R]. 廊坊:中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心,2020.
Lu M, Hou H X, Wang X, et al. 2020 Implementation Plan for the Pilot Survey of the Ground Substrate Layer of Natural Resources in Baoding[R]. Langfang: Langfang Center for General Survey of Natural Resources, China Geological Survey, 2020.

[10] 佚名. 保定幅J—50—8 1/20万地质图、矿产图说明书[Z]. 保定:河北省地质局,1965.
Nameless. Baoding J—50—08 1/200000 geological map instructions[Z]. Baoding: Hebei Provincial Geological Bureau, 1965.

[11] 国家林业局. LY/T1225—1999 森林土壤颗粒组成(机械组成)的测定[S]. 北京:中国林业科学研究院林业研究所,1999:7.
The State Forestry Administration. LY/T1225—1999 Determination of Forest Soil Particle—Size Composition (Mechanical Composition)[J]. Beijing: Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry 1999:7.

[12] 王兴,宋乃平,杨新国,等. 荒漠草原植物多样性分布格局对微地形尺度环境变化的响应[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4): 274—280, 328.
Wang X, Song N P, Yang X G, et al. The response of spatial pattern of plant diversity to environmental factors in the scale of micro—landform in desert steppe[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(4): 274—280, 328.

[13] 富金赤,李晓莎,许中旗,等. 冀北山地阳坡草本植物物种多样性的空间异质性研究[J]. 草地学报, 2018, 26(6): 1298—1304.
Fu J C, Li X S, Xu Z Q, et al. Spatial heterogeneity of herbaceous plant species diversity in dry south—slope of north mountain of Hebei[J]. Acta Agrestia Sinica, 2018, 26(6): 1298—1304.

[14] 张娜,王希华,郑泽梅,等. 浙江天童常绿阔叶林土壤的空间异质性及其与地形的关系[J]. 应用生态学报, 2012, 23(9):

2361 – 2369.

Zhang N, Wang X H, Zheng Z M, et al. Spatial heterogeneity of soil properties and its relationships with terrain factors in broad-leaved forest in Tiantong of Zhejiang Province, East China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(9): 2361 – 2369.

- [15] 王彩绒, 吕家珑, 胡正义, 等. 太湖流域典型蔬菜地土壤氮及 pH 空间变异特征[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 17 – 20.
- Wang C R, Lü J L, Hu Z Y, et al. Spatial variability of soil nitrogen and pH in vegetable field in typical area of Taihu Lake watershed [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(3): 17 – 20.

- [16] Rossi R E, Mulla D J, Journel A G, et al. Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence [J]. Ecological Monographs, 1992, 62(2): 277 – 314.

- [17] Li H, Reynolds J F. On definition and quantification of heterogeneity [J]. Oikos, 1995, 73(2): 280 – 284.

- [18] 彭彬, 周艳莲, 高苹, 等. 气温插值中不同空间插值方法的适用性分析——以江苏省为例 [J]. 地球信息科学学报, 2011, 13(4): 539 – 548.

Peng B, Zhou Y L, Gao P, et al. Suitability assessment of different interpolation methods in the gridding process of station collected air temperature: A case study in Jiangsu Province, China [J]. Journal of Geo-information Science, 2011, 13(4): 539 – 548.

- [19] 黄绍文, 金继运, 杨俐苹, 等. 县级区域粮田土壤养分空间变异与分区管理技术研究 [J]. 土壤学报, 2003, 40(1): 79 – 88.
- Huang S W, Jin J Y, Yang L P, et al. Spatial variability and regionalized management of soil nutrients in the grain crop region in Yutian County [J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(1): 79 – 88.

Analysis of spatial heterogeneity of soil substrate in mountainous plain transition area: A case study of Eastern Yi County of Hebei Province

WANG Xian, LU Min, HOU Hongxing, SUN Xiao, WANG Haohao, QIAO Yanyi, LIU Yong

(Langfang Center for General Survey of Natural Resources, China Geological Survey, Hebei Langfang 065000, China)

Abstract: Due to the early stage of current work on ground substrate investigation, and with current exploratory stage of multiple sections, the identification of the types and distribution of ground substrate is a basic task in ground substrate investigation work. In this paper, the authors investigated soil ground substrate in the mountainous plain transition area in Eastern Yi County of Hebei Province, and analyzed the spatial heterogeneity of soil ground substrate texture components (sand and clay). The content of the two components is determined to be a moderate variation, by classical statistics and geostatistics methods. The best fitted semi – variogram models are spherical models, which have a moderate degree of spatial autocorrelation within the corresponding range (7 km), thus the most reasonable sampling network size for the study area is determined to be $6.5 \text{ km}^2/\text{point}$. Kriging interpolation was carried out for the two components to form a distribution pattern map of soil ground substrate in the study area. Based on this model, the characteristics and laws of spatial heterogeneity of soil ground substrate were summarized as follows: Sandy soil ground substrate appeared in areas with low elevation and gentle slope and close to rivers, and ground substrate of clay soil appeared in mountainous areas with high elevations and steep slopes, and away from rivers, affected by topographic factors such as elevation, slope, and distance from rivers. These achievements could provide a research foundation for the deployment and expression of the results in ground substrate survey work.

Keywords: ground substrate; content of texture components; spatial heterogeneity; semi – variogram; terrain
(责任编辑: 魏昊明)