

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.06.024

曾星, 张华. 基于 GIS 的碧流河上游农田土壤性状空间分布特征. 土壤, 2023, 55(6): 1354–1362.

基于 GIS 的碧流河上游农田土壤性状空间分布特征^①

曾星, 张华*

(辽宁师范大学地理科学学院, 辽宁大连 116029)

摘要: 探究碧流河上游农田土壤性状指标现状和空间分布特征, 为研究区耕地资源的可持续利用提供科学依据和数据支持。沿碧流河上游采集农田表层(0~20 cm)土壤样品 40 份, 运用地统计学和 ArcGIS 技术, 对农田土壤性状: 比重、粒径、电导率、含盐量、pH、有机质、土壤大量营养元素(N、P、K)含量和微量营养元素(Cr、Cu、Zn、Mn、Ba)含量的空间分布特征进行系统分析。结果表明: ①农田土壤性状均属于中等空间变异, 其中 Zn 元素含量的空间变异性最强(CV=59.58%), 比重的空间变异性最弱(CV=2.61%), 受外界干扰较小。②农田土壤性状之间关联性紧密, 其中电导率与含盐量之间、pH 与 Cu 和 Mn 元素含量之间、有机质与 N 和 P 元素含量之间、K 元素含量与 Ba 元素含量之间、Cu 元素含量与 Zn 和 Mn 元素含量之间、Zn 元素含量与 Mn 元素含量之间呈显著正相关($P<0.01$)。③农田土壤粒径存在强烈的空间自相关性, Cr、Cu 元素含量空间自相关性最弱, 其他土壤性状属于中等空间自相关。研究区农田土壤性状表现出显著的空间分布差异性。

关键词: 土壤性状; 空间分布; 碧流河上游; 农田土壤

中图分类号: S158.2 **文献标志码:** A

Spatial Distribution Characteristics of Farmland Soil Properties in Upper Reaches of Biliu River Based on GIS

ZENG Xing, ZHANG Hua*

(College of Geography Science, Liaoning Normal University, Dalian, Liaoning 116029, China)

Abstract: In order to explore the present situation and spatial distribution characteristics of farmland soil indexes and to provide scientific basis and data support for sustainable utilization of cultivated land resources in the upper reaches of Biliu River, 40 soil samples (0–20 cm) were collected, soil properties including specific gravity, particle size composition, electrical conductivity, pH, the contents of salt, organic matter, macro-elements (N, P, K), micro-elements (Cr, Cu, Zn, Mn, Ba) were determined, and geostatistics and ArcGIS were used to analyze the characteristics and spatial distribution of soil properties. The results showed that the spatial variabilities of soil properties all were moderate, in which Zn was the strongest (CV=59.58%) and specific gravity was the weakest (CV=2.61%). There were close correlations between soil properties, in which significant positive correlations were found between electrical conductivity with salt, pH with Cu and Mn, organic matter with N and P, K with Ba, Cu with Zn and Mn, Zn with Mn ($P<0.01$). A strong spatial autocorrelation was found in particle size composition, the weakest spatial autocorrelation in Cr and Cu, while moderate spatial autocorrelation in other soil properties, which indicated significant differences in the spatial distributions among different soil properties in the study.

Key words: Soil properties; Spatial distribution; Upper reaches of Biliu River; Farmland soil

河、湖流域分布的农田土壤既继承了流域自然土体的特性, 也广受区域农田土壤耕作管理措施、矿产开发、“三废”排放、土壤侵蚀等诸多因素的深刻影响。基于流域农田土壤-农作物、农田土壤-河湖水体化学元素的输移, 农田土壤的一系列物理、化学、生

物性状及空间分异性不仅是判断流域农田土壤肥力高低的基本依据, 决定着流域农田的综合生产力和农作物的质量安全, 也是预测河、湖水质的的重要参考指标, 对于保障流域粮食安全、人体健康及水体生态安全具有重要支撑作用, 由此受到国内外学者的广泛关

①基金项目: 辽宁省教育厅自然科学类基本科研项目(LJ2020019、LJKZ0971)资助。

* 通讯作者(zhanghua0323@sina.com)

作者简介: 曾星(1998—), 女, 四川成都人, 硕士研究生, 主要从事土壤性状与污染研究。E-mail: 1014255425@qq.com

注。例如国内学者贺静等^[1]采用经典统计学和地统计学研究方法,对锡尔河流域哈萨克斯坦境内的农田土壤粒径特征及空间异质性进行了测试分析,发现农田耕作制度和措施可能是影响研究区土壤粒径组成空间异质性的主要因素,由此为该区域农田土壤肥力的调控以及退化土壤的改良提供了理论依据;白致威等^[2]基于第二次全国土壤普查资料和 162 个土样测试数据,对红河流域主要土类的土壤理化性质和综合生产力近 30 年来的变化特征及影响因素进行了定量研究,发现研究区土壤有机质、速效钾含量的增加有利于土壤生产力指数的提升,气温、降水和海拔等自然环境因素,以及土壤侵蚀和人为耕作管理措施同时作用于农田土壤,都是导致该流域土壤理化性质和综合生产力变化的潜在因素;谢文明等^[3]基于土壤样品和水体样品的测试结果,对太湖流域农村地区典型村镇土壤养分和水体污染现状进行了分析,发现农田土壤养分流失至水体,养殖废液、生活污水输入水体,都是导致区域内水体污染问题突出的主要原因;张维国等^[4]对太湖流域连续降雨后微生物群落从农田到河流的变化规律进行了测序研究,发现连续降雨后从稻田到河流普遍存在土壤细菌的迁移,甚至有些土壤细菌在河流中的丰度高于土壤,从而进一步阐释了太湖流域农业生产活动中经济、生态与健康之间的关系。国外学者 Michalak Aleksandra 等^[5]以奥德拉河漫滩耕地土壤为研究对象,将 2020 年秋季土壤样品的重金属浓度测试结果与 1997 年洪水泛滥期土壤样品的重金属浓度测试结果进行了比较分析,发现两次土壤样品的测试结果中 Zn、Cd、Pb 浓度均偏高,证实了土壤重金属的富集程度深受降水、融雪和冬季洪水等自然因素的影响。近年来,地统计学与 GIS 结合的方法被广泛运用于土壤性状及空间分布特征等领域研究。利用地统计学模拟土壤性状空间分布状况,再运用 GIS 进行空间插值对土壤性状进行可视化从而直观地分析土壤性状空间分布特征。顾思博等^[6]运用地统计学、空间自相关理论和 GIS 技术相结合的方法,对新疆于田县农田土壤主要微量营养元素的含量和空间分布特征进行了分析,发现土壤主要微量营养元素含量呈现由四周向中心含量逐渐增大的趋势。朱永青等^[7]运用数理统计与 ArcGIS 相关技术,对太滹运河流域不同用地方式下土壤 pH、有机质、全氮、全磷含量及其空间分布特征进行了研究,发现流域内酸性土壤分布广且均匀,全氮和有机质含量高值主要集中在中游及下游地区,全磷含量较高值集中在中下游南侧。Mauro De Feudis^[8]等运用了 GIS

技术,分析了意大利受海水影响的沿海地区土壤的主要理化性质,得到了研究区土壤的适宜性分布图,发现研究区大部分地区(80%)适合种植,不存在退化风险。

碧流河是辽东半岛独流入海的河流,干流中游地段的碧流河水库是辽宁省大连市的主要供水源地。碧流河流域村屯密集,农田和家畜养殖遍布,是辽宁省重要的农作物基地,且流域上游低山丘陵区富含金、铅、锌、萤石和硫铁矿等矿产资源,是辽东重要的金矿化集中区之一^[9],历来就有金矿开采活动,由此对流域农田土壤性状、农作物品质及河流水库水质具有较大影响。基于此,本文以碧流河上游分布的农田土壤为研究对象,运用地统计学和 ArcGIS 地统计分析模块,对研究区农田土壤性状的统计学特征及空间分异性进行系统研究,以期为碧流河上游耕地资源的可持续利用提供科学依据,也为进一步探讨碧流河上游农田土壤-水体生态系统化学元素的迁移、转化机制提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

碧流河发源于辽宁省盖州市卧龙泉镇的新开岭,流经卧龙泉镇、矿洞沟镇、万福镇、双塔镇、什字街镇、墨盘乡、明阳街道、荷花山镇、桂云满族乡、城子坦街道、城山镇、安波镇 12 个乡镇,河流全长 159.1 km,流域总面积为 2 817 km²。流域上游有卧龙泉河、矿洞沟河两条主要支流,在盖州市万福镇前阎闸村附近汇流后注入干流,流至中游的碧流河水库。由此,研究以前阎闸村为上游和中游的分界点(图 1)。

碧流河上游以侵蚀构造形成的中低山、丘陵和剥蚀堆积地貌为主,前两种地貌岩性由混合岩、千枚岩、花岗岩、石英岩、石英砂岩组成,后者岩性由棕红色、黄褐色亚黏土,亚砂土和冲积砾岩组成^[9];矿产资源主要有金、铅、锌、硫铁矿和萤石,集中分布在卧龙泉、矿洞沟等境内似斑状花岗岩岩体和角闪石花岗岩体的内接触带,其中金矿石中富含 Au 元素,Cr、Cu、Zn、Pb、As、B、Ba、Be、Cd 等伴生元素的浓度也偏高^[9]。碧流河流域地处暖温带大陆性季风气候区,土壤类型依地形由高到低依次为棕壤性土、棕壤、潮棕壤和草甸土^[10];植被属于暖温带落叶阔叶林和针阔叶混交林,以壳斗科(Fagaceae)栎属(*Quercus*)植物、榆科(Ulmaceae)和豆科(Fabaceae)植物为主。流域上游土地利用类型主要有农田、林地、草地、水域和城乡、

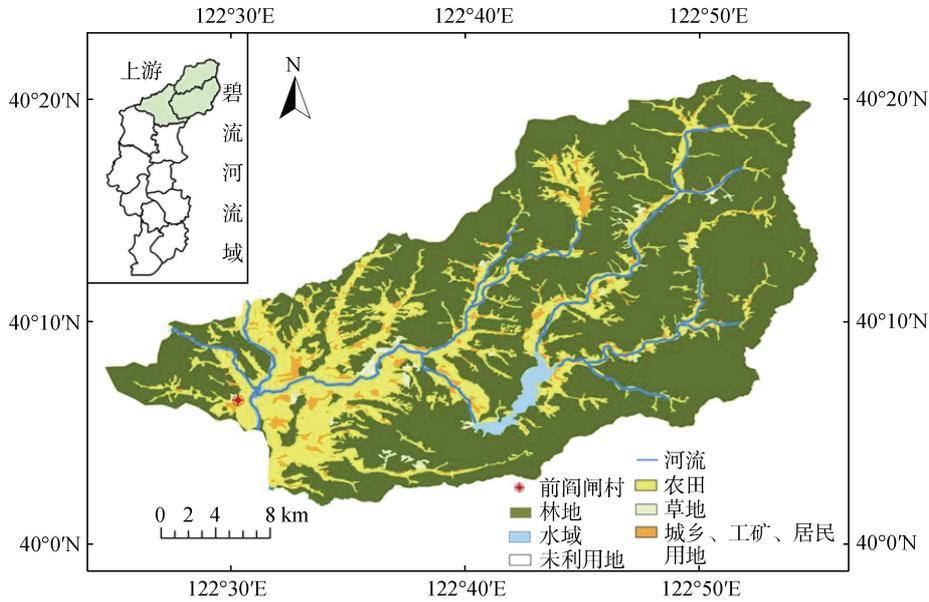


图 1 土地利用类型图
Fig. 1 Land use type map

工矿、居民用地(图 1), 其中农田面积占 40.55%, 种植的农作物以玉米为主, 花生和大豆为辅, 玉米年均产量为 6 000 ~ 9 750 kg/hm²。管理措施以施氮肥、磷肥和复合肥为主, 生长期追肥两次, 干旱季节引用碧流河水进行灌溉。

1.2 样品采集与测定

于 2021 年 10 月, 以万福镇前阁闸村为起点, 根据农田分布格局、金矿和矿石开采及冶炼场址、居民点及生产生活垃圾堆放地、村屯污水排放点等确定土样采集点, 沿万福镇段、卧龙泉河段和矿洞沟河段依

次布设土样采集点(图 2), 共采集样品 40 份(每份土样为 5 个采集点的混合样), 其中万福镇段 17 份土样, 卧龙泉河段 11 份土样, 矿洞沟河段 12 份土样。采样的同时, 采用易测宝 T2 GPS 测定采样点的经纬度及海拔高度, 并记录采样点周边的环境信息; 采用美国 Spectrum EC110 便捷式电导率速测仪测定表层土壤温度、含盐率、电导率。将采集的土样带回实验室制备后进行其物理、化学性状的测试, 其中土壤比重采用比重瓶法测定; 土壤粒径采用美国 LS13320 激光粒径分析仪进行测定; 土壤酸碱度采用酸度计

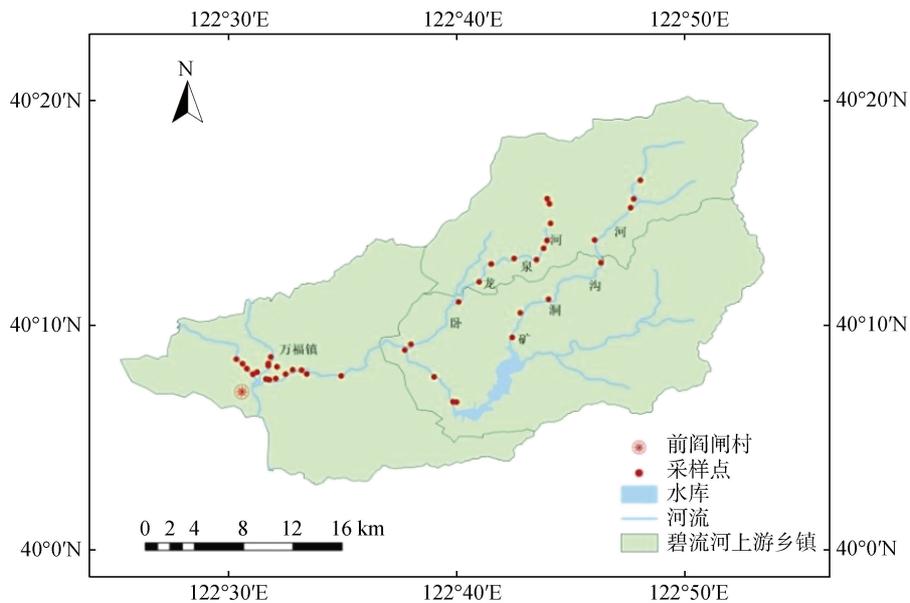


图 2 采样点分布图
Fig. 2 Distribution of sampling sites

pHS-3C 测定; 土壤有机质采用重铬酸钾-硫酸氧化法测定; 土壤化学元素采用日本 Rigaku ZSX Primus II 型全自动扫描 X 射线荧光光谱仪测定。

1.3 数据处理

基于 SPSS 22.0 软件采用 K-S 法和 Pearson 法对土壤性状测试值或转换值进行正态分布检验和相关性分析; 采用 GS+9.0 软件计算土壤性状的半方差函数, 并拟合其理论模型, 分析其空间自相关性; 采用 ArcGIS 10.4 软件的地统计模块对土壤性状进行全局趋势特征分析, 并采用反距离权重插值法对土壤性状的空间分布特征进行分析。

2 结果与分析

2.1 农田土壤性状基本特征

碧流河上游农田土壤性状统计结果如表 1。研究区农田土壤比重、粒径、电导率、含盐量、酸碱度、有机质平均值分别为 2.61 g/cm³、151.21 μm、109.52 μS/cm、

56.57 mg/kg、5.47、23.90 g/kg; 土壤大量营养元素 N、P、K 元素平均含量分别为 3.54、1.14、41.23 g/kg; 微量营养元素 Cr、Cu、Zn、Mn、Ba 元素平均含量分别为 16.08、4.68、16.55、8.29、10.99 mg/kg。农田土壤酸碱度介于 4.31 ~ 6.81, 呈强酸性、酸性和中性土, 参照全国第二次土壤普查养分分级标准^[11], 土壤养分含量处于中等水平, 部分地区土壤养分含量较丰, 农田土壤 N、K 元素含量稍丰, P 元素含量为中等水平。Zn 元素最大含量达到 54.55 mg/kg, 超出了国家土壤环境质量标准(二级)^[12]。

变异系数可以反映土壤性状空间变异性大小和抵抗外界条件的敏感程度^[13]。土壤粒径、电导率、含盐量、pH、有机质、N、P、K、Cr、Cu、Zn、Mn 和 Ba 变异系数介于 10% ~ 100%, 属于中等强度变异, 其中 Zn 元素含量的空间变异性最强, 受外界干扰变化较显著。土壤比重变异系数最小(2.61%), 空间变异性最小。

表 1 农田土壤性状基本特征
Table 1 Basic properties of farmland soils

指标	样品数	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数(%)	偏度	峰度	分布类型
比重(g/cm ³)	40	2.48	2.75	2.61	1.96	2.61	0.24	-0.742	正态
粒径(μm)	40	30.07	342.88	151.21	69.12	45.71	0.50	0.14	正态
电导率(μS/cm)	40	32.16	238.52	109.52	52.95	48.16	0.6	-0.172	正态
含盐量(mg/kg)	40	16.10	119.36	56.57	26.34	46.56	0.48	-0.326	正态
pH	40	4.31	6.81	5.47	0.64	11.88	0.58	-0.15	正态
有机质(g/kg)	40	5.35	59.06	23.90	10.56	44.20	1.17	1.81	对数正态
N(g/kg)	40	0.00	5.61	3.54	1.63	45.46	-1.43	1.00	对数正态
P(g/kg)	40	0.66	2.89	1.14	0.45	38.58	1.92	5.20	对数正态
K(g/kg)	40	32.04	51.09	41.23	4.60	11.01	0.13	-0.27	正态
Cr(mg/kg)	40	4.38	43.66	16.08	9.49	58.26	1.24	0.10	对数正态
Cu(mg/kg)	40	1.83	7.67	4.68	1.31	27.76	0.63	0.47	对数正态
Zn(mg/kg)	40	7.39	54.55	16.55	9.99	59.58	2.13	4.79	倒数正态
Mn(mg/kg)	40	3.52	18.35	8.29	2.68	32.37	1.34	4.0	正态
Ba(mg/kg)	40	7.40	15.81	10.99	2.04	18.59	0.30	-0.73	正态

碧流河上游农田土壤性状相关性分析结果见表 2, 土壤粒径与 K、Ba 元素含量呈显著正相关, 与 Cu、Mn 元素含量呈显著负相关($P < 0.01$)。电导率与含盐量呈显著正相关($P < 0.01$), 相关系数高达 0.976, 土壤电导率反映了土壤含盐量的实际状况, 电导率越大, 土壤含盐量越高; 电导率与有机质呈显著正相关($P < 0.05$), 这是因为电导率可以促进土壤养分的转化合成, 从而提高了有机质的有效性。土壤含盐量与有机质呈显著负相

关。土壤比重与 N、Cu 元素含量和有机质呈显著负相关, 因为有机质可以增强土壤通气透水性, 使得单位体积的干土质量减少, 比重减小。pH 与 Cu、Mn 元素含量呈显著正相关($P < 0.01$), 因为采集的农田土壤偏酸性, Cu、Mn 元素在酸性土壤中有效性更高, 在碱性土壤易形成 Cu(OH)₂ 和 Mn(OH)₂ 沉淀。有机质与 N、P 元素含量呈显著正相关($P < 0.01$), 因为大部分 N、P 元素是以有机化合物存在于土壤中。

表 2 农田土壤性状相关系数
Table 2 Correlation coefficients among farmland soil properties

	粒径	电导率	含盐量	pH	有机质	N	P	K	Cr	Cu	Zn	Mn	Ba
比重	0.287	-0.130	-0.138	-0.209	-0.350*	-0.444**	-0.144	0.145	0.192	-0.451**	-0.280	-0.133	0.279
粒径		-0.077	-0.060	-0.037	-0.075	-0.144	0.247	0.759**	-0.055	-0.485**	-0.285	-0.456**	0.705**
电导率			0.976**	0.027	0.379*	0.136	0.194	-0.022	0.171	0.277	0.155	-0.079	0.033
含盐量				0.005	0.375*	0.149	0.167	0.002	0.172	0.281	0.214	-0.042	0.024
pH					0.033	0.182	0.223	0.066	0.097	0.406**	0.220	0.418**	-0.084
有机质						0.514**	0.567**	-0.088	-0.078	0.284	0.164	-0.069	0.146
N							0.307	-0.086	-0.400*	0.313*	0.349*	0.168	-0.152
P								0.283	0.095	0.345*	0.167	0.073	0.257
K									-0.130	-0.343*	-0.038	-0.400*	0.686**
Cr										0.380*	-0.020	0.097	-0.186
Cu											0.656**	0.590**	-0.592**
Zn												0.488**	-0.410**
Mn													-0.560**

注: **表示 $P < 0.01$ 水平上显著相关, *表示 $P < 0.05$ 水平上显著相关。

土壤中 N 元素含量与 Cr 元素含量呈显著负相关, 与 Cu、Zn 元素含量呈显著正相关($P < 0.05$)。P 元素含量与 Cu 元素含量呈显著正相关($P < 0.05$)。K 元素含量与 Cu、Mn 元素含量呈显著负相关($P < 0.05$), 与 Ba 元素含量呈显著正相关($P < 0.01$)。Cu 元素含量与 Cr、Zn、Mn 元素含量呈显著正相关, 与 Ba 元素含量呈显著负相关。Zn 元素含量与 Mn 元素含量呈显著正相关, 与 Ba 元素含量呈显著负相关($P < 0.01$)。Mn 元素含量与 Ba 元素含量呈显著负相关($P < 0.01$)。农田土壤大量营养元素和微量元素之间的相关性受自然和人为因素共同影响, 与化学元素的有效态含量和来源密切相关。若土壤中不同化学元素的富集具有相同来源, 元素之间可能呈现正相关; 富集不同或彼此存在拮抗作用, 元素之间可能呈现负相关。

2.2 农田土壤性状空间变异特征

碧流河上游农田土壤性状半方差函数计算结果见表 3。土壤物理性状中, 比重和粒径最佳拟合模型分别为指数、高斯模型; 化学性状中, 电导率、含盐量最佳拟合模型为球状模型, 有机质最佳拟合模型为高斯模型, pH 最佳拟合模型为指数模型; 土壤大量营养元素和微量元素中, N、P、Zn、Mn、Ba 元素的最佳拟合模型为高斯模型, K、Cr、Cu 元素的最佳拟合模型分别为指数、线性和球状模型。块金值仅反映随机因素(如管理措施、城镇建设、种植制度等人类活动)引起的空间变异; 基台值反映土壤母质、地形、气候等结构性因素共同引起的空间变异^[14]; 块金系数也称为块金效应, 反映随机因素引起的空间异质性占全部系统总异质性的比重^[15]。土壤粒径块金系数为 0.18(< 0.25), 表明土壤粒径具有强烈的空间自相关性, 主导因素是成土母质, 受人为因素影响小。电导率、含盐量、比重、有机质、pH、N、P、K、Zn、Mn、Ba 元素的块金系数介于 0.25 ~ 0.75, 具有

中等程度的空间自相关性, 受随机性和结构性因素共同影响即受人因素和土壤母质、地貌等自然因素共同影响。Cr、Cu 元素的块金系数分别为 0.83、0.82(> 0.75), 说明二者空间自相关性最弱, 主要受随机性因素影响, 如区内农田耕作管理措施、金矿和矿石开采的尾矿废岩处理不当、施用化学农药、工业以及生活废水废渣未经处理排入土壤和水体等人为活动影响。N、P 元素的决定系数较小, 分别为 0.192、0.385, 说明采样点之间表现出较强的随机性, 其余性状的决定系数均大于 0.5, 表明数据能够较好反映这些土壤性状的空间结构特征。变程反映区域内变量在空间上的最大相关距离^[16]。表 3 中变程最大的是 pH(2.82 km), 表明其空间自相关性范围最广, 在研究区农田土壤分布中均一性较其他土壤性状更强, 这与土壤的自我缓冲和调节能力密切相关。其他土壤性状在变程以外的空间上相互独立, 在短距离内可能会出现一定变异现象。

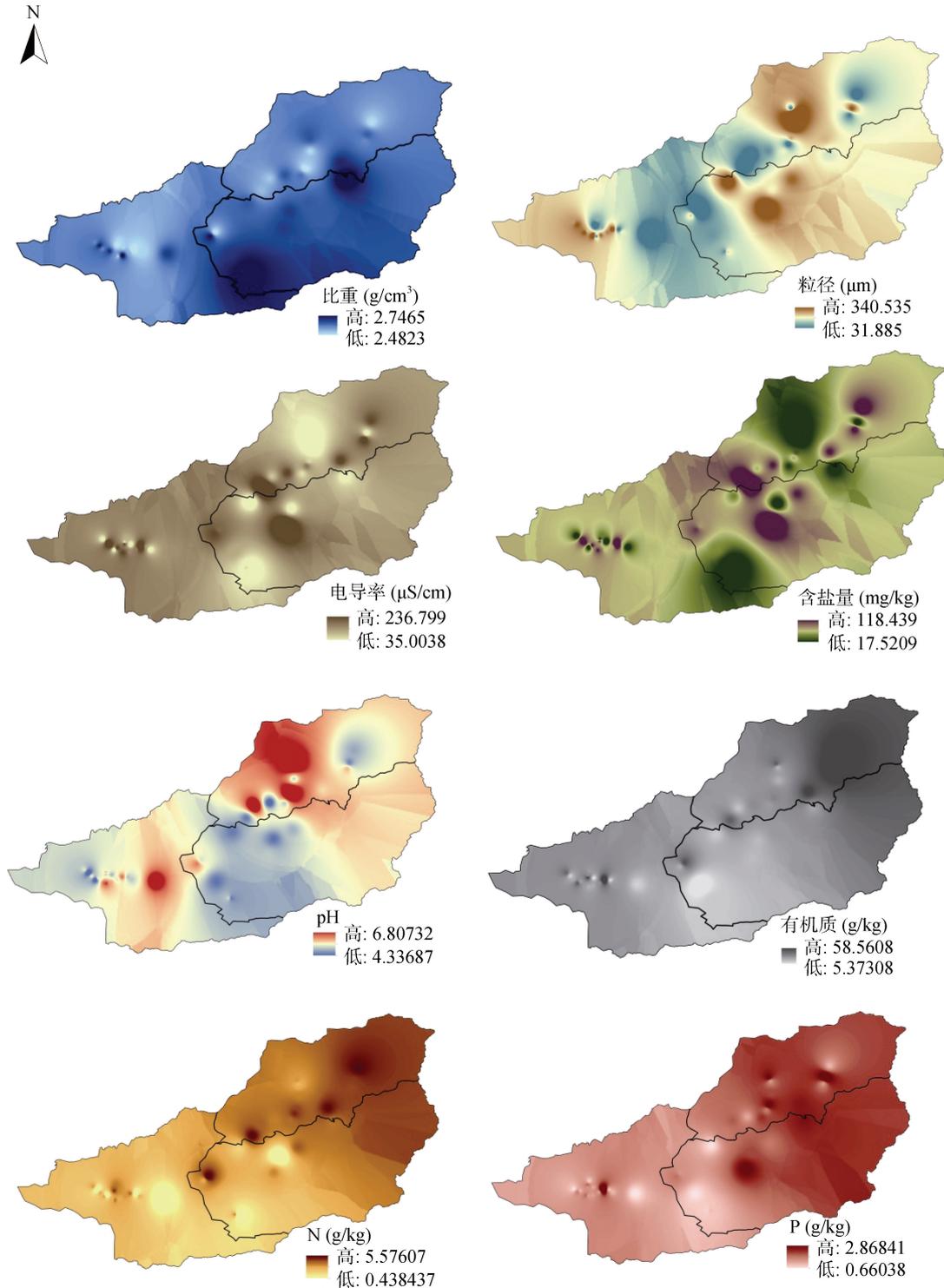
表 3 农田土壤性状半方差函数特征
Table 3 Semi-variance function characteristics of farmland soil properties

指标	理论模型	块金值 C_0	基台值 C_0+C	块金系数 $C_0/(C_0+C)$	决定系数 R^2	变程 (km)
比重	指数	0.002 6	0.005 4	0.48	0.976	1.93
粒径	高斯	219.01	1 220.56	0.18	0.778	0.55
电导率	球状	1 047.00	3 518.00	0.30	0.642	1.05
含盐量	球状	274.00	882.00	0.31	0.646	1.08
有机质	高斯	52.51	157.00	0.33	0.919	0.69
pH	指数	0.174	0.39	0.45	0.691	2.82
N	高斯	1.27	2.93	0.43	0.192	0.28
P	高斯	0.13	0.26	0.50	0.385	0.53
K	指数	4.22	14.65	0.29	0.794	0.60
Cr	线性	117.53	141.21	0.83	0.571	2.1
Cu	球状	1.41	1.71	0.82	0.501	1.76
Zn	高斯	8.33	16.86	0.49	0.616	0.90
Mn	高斯	3.46	8.06	0.43	0.671	1.55
Ba	高斯	1.33	4.43	0.30	0.654	1.80

2.3 农田土壤性状趋势分析及空间分布特征

碧流河上游农田土壤性状反距离权重插值结果见图 3。土壤比重在研究区中南部最大，土壤粒径在东部土壤较大。电导率和含盐量空间分布特征类似，表现为“中间高，南北低”。pH 分布呈现“中间低，两端高”的分布特征，研究区中部土壤呈酸性，部分土壤呈强酸性。有机质含量在研究区东北方的有林地含量最高，在中南部含量较低。土壤大量营养元素中，N、

P 元素含量在研究区西部最低，K 元素含量由东南向西北增加，在研究区中部土壤中含量最高。土壤微量元素中，Cr 元素含量表现为由西南向东北递减的分布特征，含量最高点位于研究区西南部的禽类、家畜类养殖场集中分布的西扒山村。土壤中 Cu、Zn、Mn 元素含量表现为“中间高，四周低”的分布特征，其中 Cu、Zn 元素含量最高点在某矿业公司和方远金矿附近。土壤中的 Ba 元素含量较低，在研究区中部农田土壤中含量最低。



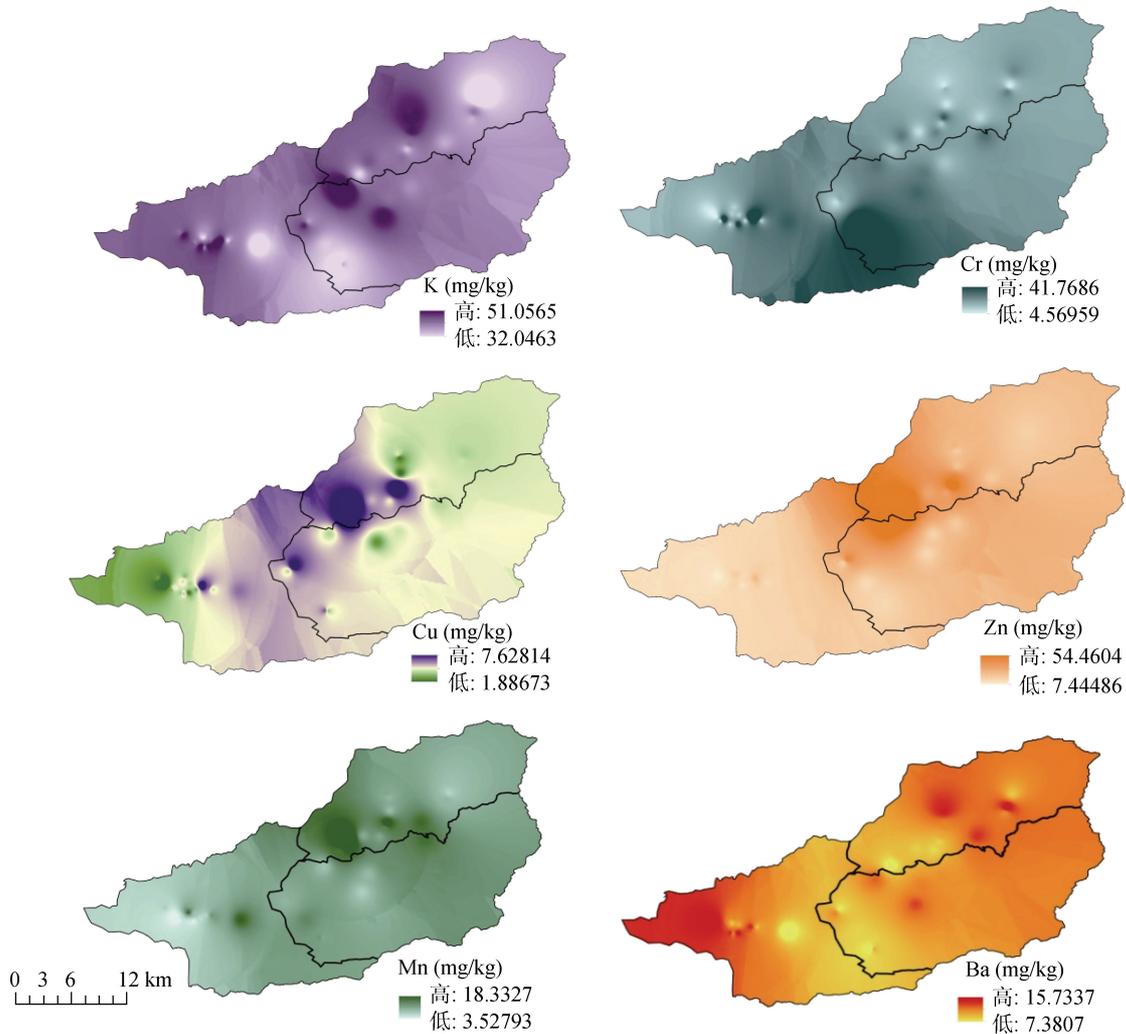


图 3 农田土壤性状含量空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution of farmland soil properties

3 讨论

农田土壤理化性状是判断土壤肥力的基本依据,对土壤保水保肥能力具有重要影响,良好的土壤性状可为耕地资源的合理利用提供支撑作用。土壤物理性状中,比重能间接反映土壤的矿物组成和有机质含量,受土壤固相组成物质的种类、含量和人为活动等因素影响,一般情况下,土壤腐殖质含量多,比重越小,土壤越疏松多孔。研究区万福镇段的小河南村附近土壤比重最小(2.48 g/cm^3),有机质含量最高(59.06 g/kg),这与该段村屯密集、农田分布集中、家畜养殖户施用腐熟有机肥、土壤深耕细作等人为活动密切相关,也与万福镇段位于矿洞沟河和卧龙泉河汇流的下游有关,上游带来了大量细小土粒和营养物质,致使小河南村附近的土壤有机质含量丰富,土质疏松,比重减小。土壤粒径决定土壤孔隙度和土壤结构类型,影响土壤持水和通气性,对土壤肥力有较大影响,

是土壤分类、管理和改良的重要依据。研究区农田土壤粒径具有强烈的空间自相关性,主要受成土母质和地理位置的影响。根据中国土粒分级标准^[17],研究区农田土壤粒径在 $250 \sim 1\,000 \mu\text{m}$ 的土壤样点占 7.5%,属于粗砂粒;粒径在 $50 \sim 250 \mu\text{m}$ 的土壤样点占 90%,属于细砂粒;粒径在 $10 \sim 50 \mu\text{m}$ 的土壤样点占 2.5%,属于粗粉粒,这说明研究区农田土壤以细砂粒为主,易耕作,但抗旱能力较弱,易漏水漏肥,土壤养分易减少,因此要增施有机肥,适时追肥。Wang 等^[18]发现土壤粒径的变化会直接影响土壤不同深度盐离子浓度分布情况以及土壤盐离子在土壤中的分布和迁移,从而间接影响土壤肥力。研究区卧龙泉河与矿洞沟河交汇处附近粒径最小($30.07 \mu\text{m}$),土壤属于粗粉粒,粒径较小,渗透和排水能力较弱,不利于土壤脱盐,该样点附近含盐量最高点为 72 mg/kg ,因此土壤粒径组成对土壤盐度和肥力有重要影响。

土壤电导率能反映土壤含盐量情况,影响土壤有机质的转化、存在状态和有效性,从而间接影响土壤肥力。研究区土壤电导率和含盐量最大值均出现在万福镇段的小河南村附近,最小值出现在万福镇段的万福初级中学附近。因为土壤电导率与含盐量呈显著正相关($r=0.976$),土壤中盐分越高,电导率也会越高,电导率可以反映土壤盐分的实际情况,受土壤质地、温度、湿度等自然因素的影响表现出明显的空间差异性。研究区土壤电导率和有机质最大值均出现在万福镇段的小河南村附近,该点电导率最大值为 $238.52 \mu\text{S}/\text{cm}$,处于作物生长的理想电导率($<250 \mu\text{S}/\text{cm}$)^[19],能有效促进土壤有机质含量的增加,从而提高土壤肥力。土壤酸碱度决定土壤有机质的存在形式和有效性,是掌握土壤肥力的基本依据。研究区农田土壤的酸碱度在人为和自然因素共同作用下出现酸化现象,万福镇段、卧龙泉河段和矿洞沟河段农田土壤酸碱度平均值为5.43、5.72、5.24,其中万福镇段的梁家堡子村附近土壤酸性极强($\text{pH}=4.31$)。这与万福镇段存在多处禽类养殖场,卧龙泉河段存在矿业开采活动,矿洞沟河段存在金矿开采、禽类养殖、污水任意排放,以及各河段农田土壤施用化学农药、养殖场的半腐熟化有机肥等人为活动密切相关。孙丽娜^[9]等发现研究区内采矿废岩和尾矿的硫化物含量较高,分别为2.3%~5.4%和20%~28%左右,具有潜在的产酸能力,硫化矿物在洗矿过程中会排出较强的酸性废水,直接影响农田土壤酸碱度,造成土壤酸化,迁移至水体后会破坏土壤-水体生态系统稳定性。因此,研究区各段土壤和水体均存有酸化风险。土壤有机质含量是判断土壤养分和肥力高低的重要指标,在耕地质量、环境保护、气候变化和农业可持续发展方面均有着至关重要的作用^[18]。研究区农田土壤有机质平均含量($23.90 \text{ g}/\text{kg}$)高于第二次土壤普查中辽宁省耕层土壤有机质平均含量^[20]($15.2 \text{ g}/\text{kg}$),参照全国第二次土壤普查养分分级标准^[11],土壤有机质含量处于中等水平,土壤肥力较高,玉米年产量最高可达 $11\ 625 \text{ kg}/\text{hm}^2$,土壤综合生产力较稳定。矿洞沟河段的八家子村附近农田土壤有机质含量最少($5.35 \text{ g}/\text{kg}$),这与农田耕作措施、土壤母质等有关,建议秸秆还田或进行轮作,从而提升农田生产力。土壤大量营养元素是植物维持正常活动所必需的营养物质,其中N、P元素含量是衡量土壤养分和肥力的重要指标,受自然因素和农业措施的影响,始终处于动态变化中^[21]。研究区农田土壤N、P元素空间分布与有机质含量空间分布基本一致,这与氮素损失机制与碳素损失过程相近、土壤氮元素的

95%源自于土壤有机质^[22]密切相关。研究区万福镇段和矿洞沟段出现N、P元素缺失带,土壤肥力降低,建议采取耕作措施,提高土壤生产力,从而促进土壤综合生产力。土壤K元素主要来源于土壤母质释放和施用的钾肥,受人为因素和自然因素共同影响,K元素在卧龙泉河段的娘娘庙村、大南沟村及矿洞沟河段蒋屯村的农田土壤含量较高。土壤微量元素是作物生长发育所必需的微量营养元素,与土壤肥力息息相关。研究区Zn元素含量受成土母质和人为活动共同影响,在万福镇段金厂沟村的鑫龙矿业公司附近农田土壤中Zn含量最高,超过了国家土壤环境质量标准,存在重金属污染现象,这与该河段的矿石开采活动密切相关,矿石开采和洗矿等加剧了母岩中Zn元素的释放和扩散,使其空间变异性增强。Cr、Cu、Ba元素含量最高点均在万福镇段,与辽宁省土壤背景值^[12]对比无微量元素超标现象,但该河段存在多处禽类养殖场,大量禽类粪便露天堆放使重金属直接进入土壤,长期如此会造成重金属的累积,通过化学元素迁移转换后,将会影响作物的生产以及质量安全,同时会对碧流河河水和滩地造成污染,因此万福镇段农田土壤可能存在重金属污染地潜在风险,应予以重视。

研究碧流河上游农田土壤性状空间分布特征对探究整个上游区域生态环境、土地利用及景观格局等方面有较大的意义。研究区农业生产等人为活动对农田土壤-水体生态系统造成的破坏主要表现在土壤肥力降低、土壤污染、河湖污染等,通过物质循环和能量流动最终影响到整个上游区域生态环境。研究区土地利用类型中农田比例较高,沿河流呈现树枝状分布,具有明显的地带性分异特征,且区域内农业生产模式较为成熟,选择河流附近农田具重要的意义。此外,人为活动改变了研究区的景观组成要素和空间格局,林地、水域、耕地和建设用地的变化较为明显,因此研究流域附近的农田土壤可为进一步探讨碧流河上游农田土壤-水体生态系统、耕地资源的可持续发展和区域景观动态提供基础数据和科学支撑。研究区范围较广阔,自然因素、社会经济因素等影响较复杂,因此对土壤性状的空间分布和变异仍需深究。

4 结论

1)碧流河上游农田土壤以细砂粒为主,土壤整体偏酸性,土壤养分处于中等水平,N、K元素含量稍丰,P元素含量为中等水平,土壤微量营养元素中Zn元素在部分地区出现含量超标现象。相关性分析发现,土壤电导率与含盐量相关性最强($r=0.976$),呈

极显著正相关。

2)半方差函数计算结果显示,研究区农田土壤粒径具有强烈的空间自相关性,电导率、含盐量、比重、有机质、pH、N、P、K、Zn、Mn、Ba 元素具有中等程度的空间自相关性,受结构性和随机性因素共同影响,Cr、Cu 元素受随机性因素影响最显著,空间自相关性弱,空间变异性最强。

3)反距离权重插值表明,农田土壤性状空间分布特征显著,呈斑块状分布。万福镇段的家畜养殖、卧龙泉河段和矿洞沟河段的矿业公司、金矿开采以及农田耕作措施等人为活动加剧了研究区农田土壤性状的空间分异性,使得土壤性状空间分布差异明显。万福镇段农田土壤出现了重金属污染潜在风险,这会对农田土壤质量和流域土壤-水体生态系统产生一定影响。

参考文献:

- [1] 贺静,吉力力·阿不都外力,马龙,等. 锡尔河流域哈萨克斯坦境内农田土壤粒度特征及空间异质性[J]. 干旱区研究, 2022, 39(4): 1282-1292.
- [2] 白致威,冯德泰,丁剑宏,等. 红河流域土壤理化性质变化特征及其环境主控因子分析[J]. 云南地理环境研究, 2015, 27(4): 63-70, 78.
- [3] 谢文明,于飞,冯晓宇,等. 太湖流域农村地区典型村镇土壤养分和水体污染现状调查[J]. 土壤, 2014, 46(4): 613-617.
- [4] 张维国,邸攀攀,易能,等. 连续降雨后太湖流域典型农田土地利用方式下土壤入湖河流水体细菌群落的变化[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(1): 48-57.
- [5] Michalak A, Świsłowski P, Rajfur M. The assessment of heavy metal contamination of the cultivated soils in the Odra River floodplain[J]. Chemistry-Didactics-Ecology-Metrology, 2021, 26(1/2): 55-64.
- [6] 顾思博,周金龙,曾妍妍,等. 绿洲农田土壤微量营养元素的空间变异性研究——以新疆于田县为例[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(3): 118-123.
- [7] 朱永青,崔云霞,李伟迪,等. 太滹运河流域不同用地方式下土壤 pH 值、有机质及氮磷含量特征分析[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(2): 171-178.
- [8] De Feudis M, Falsone G, Gherardi M, et al. GIS-based soil maps as tools to evaluate land capability and suitability in a coastal reclaimed area (Ravenna, northern Italy)[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2021, 9(2): 167-179.
- [9] 孙丽娜. 碧流河上游金矿开发环境地球化学及其生态影响[D]. 沈阳: 东北大学, 2002.
- [10] 李明月. 碧流河下游沿岸土壤特性及重金属污染生态风险评估[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2018.
- [11] 田雨,庄莹,曹义,等. 雾灵山低山区土地利用类型对土壤理化性质的影响[J]. 水土保持研究, 2012, 19(6): 41-44.
- [12] 曹露,张华,李明月,等. 碧流河下游农田土壤重金属污染状况分析与评价[J]. 生态科学, 2017, 36(6): 8-15.
- [13] 杨之江,陈效民,景峰,等. 基于 GIS 和地统计学的稻田土壤养分与重金属空间变异[J]. 应用生态学报, 2018, 29(6): 1893-1901.
- [14] 李瑞平,姜咏栋,李光德,等. 基于 GIS 的农田土壤重金属空间分布研究——以山东省泰安市为例[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2012, 43(2): 232-238.
- [15] 秦富仓,牛晓乐,杨振奇,等. 冒山小流域不同地形和土地利用下的土壤养分空间变异特征[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(6): 138-148.
- [16] 陈志超,杨小林,刘昌华. 万安流域不同土地利用类型土壤全磷时空分异特征[J]. 土壤通报, 2014, 45(4): 857-862.
- [17] 伍光,王乃昂,胡双熙. 自然地理学[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [18] Wang J Y, Liu Y X, Wang S M, et al. Spatial distribution of soil salinity and potential implications for soil management in the Manas River watershed, China[J]. Soil Use and Management, 2020, 36(1): 93-103.
- [19] 王瑞东,颀建明,冯致,等. 不同微生物菌剂对棉秆高温好氧堆肥的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2019, 54(1): 68-73.
- [20] 杨帆,徐洋,崔勇,等. 近 30 年中国农田耕层土壤有机质含量变化[J]. 土壤学报, 2017, 54(5): 1047-1056.
- [21] 姚喜军,徐进才,刘静,等. 伊金霍洛旗不同土地利用方式下的土壤养分特征[J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(5): 111-116.
- [22] 杨佳,于志军,王参,等. 雄安新区不同土地利用方式土壤性状的空间分布特征——以容城县为例[J]. 生态学报, 2021, 41(17): 6764-6772.