

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2024.01.025

于路加, 王翠平, 马海军, 等. 银川市黄河滩地土壤性状空间分布特征与肥力质量评价. 土壤, 2024, 56(1): 202–213.

银川市黄河滩地土壤性状空间分布特征与肥力质量评价^①

于路加¹, 王翠平^{1,2*}, 马海军^{1,2}, 杨怀秋¹

(1 北方民族大学生物科学与工程学院, 银川 750021; 2 宁夏葡萄与葡萄酒技术创新中心, 银川 750021)

摘要: 为阐明银川市黄河滩地土壤性质的空间分布特征, 分析不同用地类型(荒地、林地、耕地、退耕地)之间土壤性质的差异, 通过均匀取样法实地采集银川市黄河滩地耕层土壤样品 92 份, 采用地统计学和模糊数学法对土壤容重、孔隙度、田间持水量等物理性质和 pH、电导率、可溶性盐、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾、硝态氮、铵态氮等化学性质的空间分布特征进行了分析和综合评价。结果表明: 银川市黄河滩地表层土壤容重在 1.07 ~ 1.52 g/cm³, 田间持水量为 18.18% ~ 31.16%, 总孔隙度介于 33.60% ~ 49.83%, 毛管孔隙度在 26.67% ~ 36.43%, 非毛管孔隙度为 5.6% ~ 17.00%; 土壤均为盐碱土, 氮、磷元素含量偏低, 其余养分含量处于中等水平; 不同用地类型之间, 林地的物理特征表现最优, 退耕地土壤 pH 显著高于耕地($P < 0.05$), 电导率、可溶性盐和铵态氮含量均表现为退耕地显著高于其他 3 种用地类型($P < 0.05$), 全磷含量表现为林地显著低于其他 3 种用地类型($P < 0.05$), 有效磷含量表现为耕地和退耕地显著高于林地和荒地($P < 0.05$), 其余理化性状差异不显著; 田间持水量、总孔隙度和非毛管孔隙度在空间上的分布总体表现为上游偏大、下游偏小, 容重、pH、电导率、可溶性盐含量、有效磷含量在空间上的分布特征与之相反, 其余理化性状空间分布特征规律性不明显。研究区土壤综合肥力指数(IFI)平均值处于中下水平, 土壤 pH 和无机态氮是土壤质量的制约因子, 要改善土壤酸碱度、提高氮素含量才能提高整体土壤质量水平。

关键词: 黄河滩地; 土壤理化特性; 土壤肥力评价; 空间分布

中图分类号: S151.9; X825 文献标志码: A

Spatial Distribution of Soil Properties and Evaluation of Fertility Quality of Yellow River Floodplains in Yinchuan City

YU Lujia¹, WANG Cuiping^{1,2*}, MA Haijun^{1,2}, YANG Huaiqiu¹

(1 School of Biological Science and Engineering, North Minzu University, Yinchuan 750021, China; 2 Ningxia Grape & Wine Innovation Center, Yinchuan 750021, China)

Abstract: To elucidate the spatial distribution characteristics of soil properties in the Yellow River floodplains in Yinchuan and to analyze the differences in soil properties among different land use types, 92 soil samples were collected from the cultivated layers by homogeneous sampling, soil properties included bulk density, porosity, field water capacity, pH, electrical conductivity, salinity, organic matter, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, available nitrogen, available phosphorus, available potassium, nitrate nitrogen and ammonium nitrogen were determined and their spatial distribution characteristics were discussed, meanwhile soil fertility quality were also comprehensively evaluated by geostatistics and fuzzy mathematical methods. The results showed that soil bulk weight was of 1.07 – 1.52 g/cm³, field water capacity of 18.18% – 31.16%, total porosity of 33.60% – 49.83%, capillary porosity of 26.67% – 36.43%, and non-capillary porosity of 5.6% – 17.00%; soils were alkaline and with low nitrogen and phosphorus contents. Forest land had the best soil physical characteristics, the pH of the abandoned land was significantly higher than that of the cropland ($P < 0.05$), electrical conductivity, salinity and ammonium nitrogen were significantly higher in the fallow land than in the other three land types ($P < 0.05$), total phosphorus significantly lower in forest land than in the other three land types ($P < 0.05$), and available phosphorus significantly higher in cropland and abandoned land than in forest and wasteland ($P < 0.05$), while the other physicochemical properties were not significantly different among different land use types. The overall spatial distribution of field water capacity, total porosity and non-capillary porosity were larger upstream and smaller

①基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2021BEG02006)资助。

* 通讯作者(wangcuiping@nmu.edu.cn)

作者简介: 于路加(2000—), 女, 河南通许人, 硕士研究生, 主要从事植物生态学研究。E-mail: yulujia2000@163.com

downstream, but opposite for bulk density, pH, electrical conductivity, salinity and available phosphorus, meanwhile the spatial distribution of the other physicochemical properties were irregular. The average value of soil integrated fertility index (IFI) was from the middle to the lower levels. Soil pH and inorganic nitrogen were the factors dominating soil quality indicating soil fertility can be improved mainly by improving pH and nitrogen content.

Key words: Yellow River floodplain; Soil physiochemical properties; Soil fertility evaluation; Spatial distribution

2020年6月,习近平总书记在宁夏考察时指出:要把保障黄河长治久安作为重中之重,实施河道和滩区综合治理工程,统筹推进两岸堤防、河道控导、滩区治理,推进水资源节约集约利用,统筹推进生态保护修复和环境治理,努力建设黄河流域生态保护和高质量发展先行区^[1]。黄河滩地是沿黄经济带的重要组成部分,对打造沿黄生态经济有着不可替代的意义。

河滩地是指在河流的流水作用下发育形成的、位于天然河岸两侧或人工堤之间的湿地,是河道生态系统的重要组成部分。同时滩地作为水域与陆域的过渡区域,是河道中水文、环境和生态过程相互作用的敏感区,对洪水调蓄、存储泥沙、水质净化、生物栖息等具有重要价值^[2]。由于滩地的丰富功能与位置的独特性,有关滩地的土壤性质空间分布特征及质量评价也受到了许多学者的关注。如,许景伟等^[3]和吕圣桥^[4]分别对黄河三角洲滩地不同土地利用类型下的土壤水文特性和土壤颗粒分形特征进行了研究;周学锋等^[5]研究了围垦后不同土地利用方式对长江口滩地土壤粒径的影响以及时间动态差异。在宁夏,黄河滩地是沉积黄河泥沙、滞蓄大洪水的重要区域,同时也是宁夏经济发展和农业生产的重要地带。目前对宁夏黄河流域的水质、径流、水沙演变、土壤重金属和土壤盐渍化等已经进行了大量研究,并取得了丰硕的成果。Jin等^[6]对黄河宁夏段2016—2020年的水质变化进行了调查,发现高浓度的总氮对水体产生了污染,该结果为黄河宁夏段水污染治理提供了理论依据。Shen等^[7]和Zhang等^[8]对黄河宁夏段引黄灌区土壤重金属含量进行了测定、风险评估和污染源分析,为引黄灌区土壤治理和环境修复提供了依据。邓丽等^[9]探究了宁夏引黄灌区土壤盐渍化现状和影响因素,为改善土壤盐渍化提供了有力的支撑。然而,这些研究大多关注于宁夏黄河流域的土壤和水质现状,对滩地的研究却相对匮乏,且未见对黄河滩地土壤性质空间分布及肥力质量评价的定量研究。

银川市黄河滩地耕地面积大,人类活动频繁,严重破坏原有植被及河滩地自然生态,造成河滩地生态系统退化、水源涵养功能降低。目前,由于建设黄河流域生态保护和高质量发展先行区的需要,银川市黄

河西岸滩地已经全部退耕,退耕后的河滩地面临土地资源规划利用、生态保护等问题。土壤理化性质的空间分布特征能够揭示土壤质量的空间分布规律及影响因素。不同的土地利用方式是导致土壤性状和肥力发生改变的重要影响因素。了解土壤理化性质的空间分布特征和土壤肥力的变化对评估河滩地土壤质量状况具有重要意义。基于此,本研究以宁夏银川市黄河滩地为研究对象,结合地统计学和模糊数学方法分析黄河滩地土壤性质空间变异特征,并对其土壤肥力质量进行综合评价,以全面掌握研究区土壤质量现状,为银川市黄河滩地的生态恢复、土地资源开发利用、土壤改良等提供理论依据,为建设黄河流域生态保护和高质量发展先行区提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区银川市黄河滩地位于宁夏回族自治区银川市东侧,地理位置为106°12'E ~ 106°34'E, 38°7'N ~ 38°40'N。黄河银川段自吴忠市利通区与灵武市交界入境,于贺兰县与平罗县交界出境,途经灵武市、永宁县、兴庆区、贺兰县4个县(市)区,河道总长83.8 km,占黄河宁夏段21%,河滩地规划总面积1 387.33 km²,区内地势平坦,南高北低,排灌便利,海拔高度在1 109 ~ 1 116 m。该区处于我国西北内陆地区,属中温带干旱气候区,具有典型的大陆性气候特征,气候干燥,雨量少而集中,蒸发量强,年平均气温为8.5℃,多年平均降水量212 mm,降水的季节变化和年际变化均较大,降水集中在7、8、9三个月,平均占全年降水量的61.6%,年均相对湿度57%,年均蒸发量为2 862 mm,为年降水量的10.5倍。土壤类型主要为灌淤土,土壤质地主要为壤土、砂质土。目前主要用地类型有河滩荒地、耕地(主要种植水稻、玉米、大豆等作物)、林地(主要种植刺槐、沙枣、柳树、杨树等)和退耕地(2019年回收为撂荒地)。

1.2 样品采集与分析

1.2.1 样品采集 于2022年6月在银川市黄河两岸滨河大道以内,每隔约2 000 m均匀布设1个采样区,共设置92个采样区(图1),其中林地、荒地、耕

地和退耕地采样区数量分别为 26、8、15、43 个。在每个采样区,除去地表覆盖物后,用五点采样法采集 0~20 cm 土层的土壤样品,混合均匀后用四分法留取 2 kg 左右装入牛皮纸袋,用于土壤化学性质的测定。因黄河西岸全部退耕,在东岸 38~40 号、47~92 号,共 49 个采样区另设土壤物理性质采样点,其中

林地、荒地、耕地和退耕地采样区数量分别为 10、3、3、33 个。在每个采样区表层土样点附近的无扰动地表使用 100 cm³ 环刀采集土壤样品,采样深度为 5 cm,每个采样区重复取 3 个土壤样品,共采集 147 个土壤物理性质测定样品。采样同时记录每个样地中心位置的经纬度信息和海拔信息。

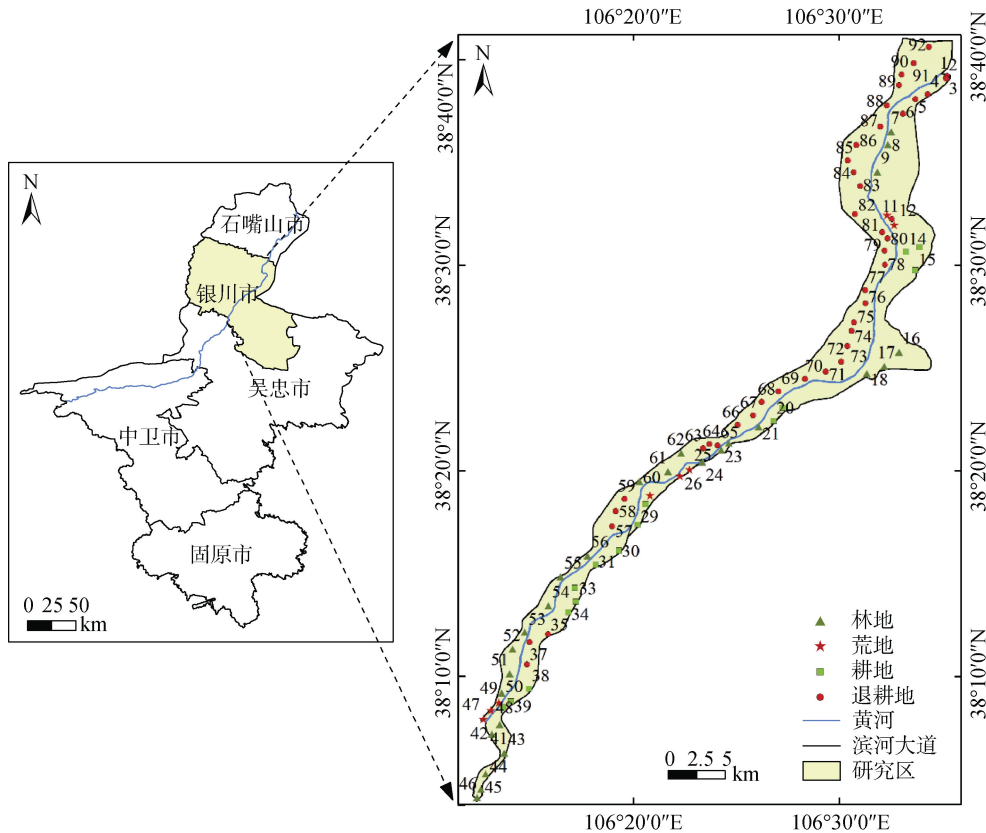


图 1 研究区与采样点图

Fig. 1 Study area and soil sampling sites

1.2.2 样品分析 采用环刀法^[10]测定土壤容重、孔隙度和田间持水量。样品去除石块、动植物残体及其他异物,一部分过 2 mm 筛后于 4℃ 冰箱保存,用于测定土壤硝态氮、铵态氮;另一部分自然风干后过 2 mm 筛,用于土壤 pH、电导率及可溶性盐、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷和速效钾含量的测定。参考《土壤农化分析》^[11],采用重铬酸钾外加热法测定有机质,凯氏定氮法测定全氮, HClO₄-H₂SO₄ 消化-钼锑抗比色法测定全磷, NaOH 熔融-火焰光度计法测定全钾,碱解扩散法测定碱解氮, NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法测定有效磷, NH₄Ac 浸提火焰光度计法测定速效钾,电位法(水土质量比为 5:1)测定 pH,电导率仪(水土质量比为 5:1,雷磁电导率仪 DDSJ-308F)测定电导率,质量法(水土质量比为 1:5)测定可溶性盐,硝态氮、铵态氮用 KCl

浸提-流动分析仪测定^[12]。

1.3 研究方法

1.3.1 土壤理化性质的空间变异性分析 地统计学中的二阶矩变异函数,即半方差函数,可以反映研究区土壤性质的空间变异,在确定土壤取样数目及进行 Kriging 空间插值时具有重要的作用^[13]。其公式为:

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

式中: y 表示间隔距离为 h 点的半方差值, h 为空间间隔点的距离即步长; N 为样点观测数值成对的数目; $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 为样点测定值。常用的半方差函数模型有球状、高斯、指数模型。

1.3.2 土壤肥力质量综合评价指标权重的确定 评价指标及其权重构成了土壤肥力综合评价指标体系。因物理性质相对较稳定和生物性质变化太快等原因

其常不被选为土壤肥力评价指标,而土壤养分是土壤肥力的核心部分,所以常用氮、磷、钾、有机质等养分来综合衡量土壤肥力高低^[14]。综合考虑评价指标的可获取性、系统性和连续性,本研究选取了土壤 pH、电导率及可溶性盐、有机质、硝态氮、铵态氮、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷和速效钾含量 12 个指标作为参评指标综合反映土壤肥力状况。由

于各指标对土壤整体质量的贡献不一致,故对各项指标给予一定的权重^[15]。采用避免人为主观影响的相关系数法^[16]确定各评价指标的权重,计算公式为:

$$w_i = \bar{x}_i / \sum \bar{x}_i \quad (2)$$

式中: w_i 为某项指标的权重; \bar{x}_i 为某项指标与其他指标之间相关系数的平均值; $\sum \bar{x}_i$ 为所有指标相关系数平均值总和。本研究求得各评价因子的权重见表 1。

表 1 土壤各评价指标相关系数均值及权重
Table 1 Correlation coefficients and weights of soil evaluation indices

指标	pH	电导率	可溶性盐	有机质	碱解氮	全氮	全磷	全钾	有效磷	速效钾	铵态氮	硝态氮
相关系数均值	0.262	0.356	0.351	0.480	0.476	0.484	0.461	0.330	0.387	0.356	0.222	0.302
权重	0.059	0.080	0.079	0.107	0.106	0.108	0.103	0.074	0.087	0.080	0.050	0.068

1.3.3 土壤质量综合评价指标的隶属度计算 由于各评价指标对土壤整体质量的影响不同且实测值的量纲也各异,所以在求算土壤肥力综合指标时,需要将各评价指标进行一定的数学处理^[15]。隶属度函数是评价指标与作物生长效应曲线相关关系的数学表达式,根据王建国等^[17]的研究,电导率和可溶性盐含量用反 S 型隶属函数(公式(3)),其余评价指标用 S 型隶属函数(公式(4)),各评价指标的最小值和最大值作为函数的转折点 x_1 、 x_2 (表 2)。另外,参考前人研究^[18], pH 的隶属度由经验法得出(表 3)。

$$f(x) = \begin{cases} 0.1 & x \geq x_2 \\ \frac{0.9(x_2 - x)}{x_2 - x_1} + 0.0 & x_1 < x < x_2 \\ 1.0 & x \leq x_1 \end{cases} \quad (3)$$

$$f(x) = \begin{cases} 0.1 & x \leq x_1 \\ \frac{0.9(x - x_1)}{x_2 - x_1} + 0.1 & x_1 < x < x_2 \\ 1.0 & x \geq x_2 \end{cases} \quad (4)$$

1.3.4 土壤质量综合评价方法 根据各土壤质量评价指标的权重和隶属度计算土壤综合肥力指数

(IFI), 计算公式如下:

$$IFI = \sum_{i=1}^n w_i \times f_i \quad (5)$$

式中: n 为参评因子数; w_i 为第 i 个因子的权重; f_i 为第 i 个因子的隶属度。IFI 取值为 0~1, 其值越接近 1, 表明土壤质量越高。

1.4 数据处理

采用 Excel 2019 进行数据描述统计;采用 SPSS 22.0 对土壤理化性质进行 Kolmogorov-Smirnov 正态分布检验,对不符合正态分布的数据采用 Minitab 2022 进行转换使其符合正态分布;采用 Pearson 法对土壤理化性质进行相关分析;采用 One-way ANOVA 法对不同用地类型的土壤理化性质进行方差分析,并采用 LSD 法进行多重比较,显著性水平为 $P < 0.05$;采用 GS+9.0 分析、构建土壤性状的最优半方差函数模型及参数;采用 ArcGIS 10.0 绘制研究区与采样点图;采用 Kriging 空间插值法绘制土壤理化性质与土壤综合肥力指数(Integrated Fertility Index, IFI)空间分布图;采用 Origin 2022 绘制雷达图。

表 2 土壤属性隶属度值
Table 2 Membership values of soil evaluation indices

指标	电导率	可溶性盐	有机质	碱解氮	全氮	全磷	全钾	有效磷	速效钾	铵态氮	硝态氮
x_1	0.1	0.2	2.7	5.6	0.2	0.3	16.0	1.8	37.1	2.8	1.4
x_2	7.9	26.3	30.6	100.5	1.8	1.2	25.1	68.8	501.5	13.8	110.7

表 3 pH 的隶属度值
Table 3 Membership value of soil pH

pH	<6.5	6.5~7.0	7.0~7.5	7.5~8.0	8.0~8.25	8.25~8.5	>8.5
隶属度	0.5	1.0	0.9	0.7	0.5	0.2	0.1

2 结果与分析

2.1 银川市黄河滩地土壤理化性质

从表 4 可以看出,银川市黄河滩地表层土壤容重在 1.07 ~ 1.52 g/cm³,田间持水量为 18.18% ~ 31.16%,总孔隙度介于 33.60% ~ 49.83%,毛管孔隙度在 26.67% ~ 36.43%,非毛管孔隙度为 5.60% ~ 17.00%。土壤 pH 为 7.8 ~ 8.92,土壤呈碱性。土壤可溶性盐含量均值为 5.91 g/kg,属于重度盐渍土。根据全国第二次土壤普查标准^[19],对银川市黄河滩地土壤养分性质进行等级划分,其中,有机质平均含量属于四级水平,全钾、有效磷、速效钾平均含量属于二级水平,

全氮、碱解氮、全磷平均含量属于五级水平。从变异系数上看,土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度、pH 和全钾表现为弱变异,硝态氮表现为强变异,其他土壤性状属于中等变异强度。容重、总孔隙度、pH 和全磷的偏度为负值,其分布峰为左偏,其他理化性质的偏度值为正值,分布峰为右偏。对各项土壤理化性质进行 K-S 正态分布检验,除容重外,其他物理性质均符合正态分布特征,容重数据进行指数变换后通过正态分布检验;pH、有机质、全氮、碱解氮、有效磷通过正态分布检验,其余化学性质均未通过检验,对不符合正态分布的指标数据进行对数、Johnson、Box-Cox 变换使其符合正态分布特征。

表 4 土壤理化性质描述性统计
Table 4 Descriptive statistics of soil physiochemical properties

理化性质	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数(%)	偏度	峰度	数据变换
容重(g/cm ³)	1.07	1.52	1.31	0.09	6.84	-0.02	0.84	指数
田间持水量(%)	18.18	31.16	23.83	2.92	12.27	0.67	0.20	-
总孔隙度(%)	33.60	49.83	42.30	3.68	8.70	-0.23	-0.24	-
毛管孔隙度(%)	26.67	36.43	30.88	2.41	7.81	0.21	-0.72	-
非毛管孔隙度(%)	5.63	17.00	11.32	3.31	29.27	0.17	-1.18	-
pH	7.80	8.92	8.44	0.24	2.79	-0.03	-0.54	-
电导率(mS/cm)	0.05	7.94	1.96	1.86	94.87	1.399	2.142	Johnson
含盐量(g/kg)	0.16	26.27	5.91	5.42	91.70	1.179	1.067	Johnson
有机质(g/kg)	2.72	30.62	12.23	5.27	43.07	0.73	1.09	-
碱解氮(mg/kg)	5.60	100.45	48.97	18.78	38.35	0.005	0.526	-
全氮(g/kg)	0.21	1.85	0.69	0.33	47.54	1.22	2.243	-
全磷(g/kg)	0.31	1.16	0.72	0.14	19.86	-0.623	1.963	对数
全钾(g/kg)	15.98	25.06	20.26	1.68	8.27	0.291	0.369	Box-Cox
有效磷(mg/kg)	1.80	68.80	21.47	14.57	67.84	0.746	0.153	-
速效钾(mg/kg)	37.08	501.54	184.60	83.80	45.40	1.126	2.358	对数
铵态氮(mg/kg)	2.79	13.80	4.52	1.56	34.42	2.75	12.714	Johnson
硝态氮(mg/kg)	1.43	110.71	18.09	20.63	113.99	2.325	6.198	对数

注:以 K-S 检验结果 Sig>0.05,服从正态分布。

2.2 不同用地类型土壤理化性质

由表 5 可知,4 种用地类型的土壤容重平均值为 1.22 ~ 1.37 g/cm³,林地显著低于其他用地类型 ($P<0.05$),荒地、耕地和退耕地的土壤较为紧实且差异不显著 ($P>0.05$);田间持水量在 21.06% ~ 27.28%,林地显著高于其他用地类型 ($P<0.05$),荒地、耕地和退耕地间无显著差异 ($P>0.05$);总孔隙度在 37.05% ~ 46.46%,不同用地类型之间差异显著 ($P<0.05$),耕地明显小于其他用地类型,林地显著大于耕地和退耕地,与荒地差异不显著;毛管孔隙度在 28.89% ~ 33.09%,林地显著高于荒地和耕地 ($P<0.05$),与退耕地差异不显著 ($P>0.05$);非毛管孔隙度在 8.44% ~

14.44%,荒地和林地显著高于耕地和退耕地 ($P<0.05$),荒地与林地、耕地与退耕地之间差异不显著 ($P>0.05$)。

不同用地类型的土壤 pH 在 8.29 ~ 8.50,均属碱性土壤,退耕地显著高于耕地 ($P<0.05$),其他用地类型之间差异不显著 ($P>0.05$);电导率、可溶性盐和铵态氮含量分别在 0.71 ~ 3.1 mS/cm、2.29 ~ 9.27 g/kg、3.67 ~ 5.19 mg/kg。退耕地为盐土(可溶性盐含量>6 g/kg),其他用地均为中度盐渍土(可溶性盐含量 2 ~ 4 g/kg)^[11]。铵态氮含量退耕地明显高于其他用地类型 ($P<0.05$),林地、荒地、耕地之间差异不显著 ($P>0.05$)。不同用地类型的全磷含量在 0.60 ~ 0.77 g/kg,均属于三级水

平, 林地明显低于其他 3 种用地类型($P<0.05$), 退耕地、耕地和荒地之间无显著差异($P>0.05$); 有效磷含量在 9.53 ~ 28.20 mg/kg, 耕地和退耕地均属于二级水平, 林地和荒地处于四级水平, 耕地和退耕地显著高于林地和荒地($P<0.05$), 耕地与退耕地、林地与荒地之间无显著差异($P>0.05$); 有机质含量为 10.88 ~ 13.36 g/kg, 整体均处于四级水平; 全氮含量在 0.60 ~

0.76 g/kg, 退耕地处于四级水平, 林地、荒地和耕地属于五级水平; 碱解氮含量在 41.32 ~ 53.06 mg/kg, 处于五级水平; 全钾含量在 19.78 ~ 21.01 g/kg, 整体均属于三级水平; 速效钾含量在 132.10 ~ 223.38 mg/kg, 耕地属于三级水平, 林地和退耕地属于二级水平, 荒地属于一级水平; 硝态氮含量在 11.87 ~ 23.38 mg/kg, 耕地和退耕地(>20 mg/kg)高于林地和荒地(10 ~ 20 mg/kg)。

表 5 不同用地类型土壤理化性质
Table 5 Soil physiochemical properties of different land use types

理化性质	林地	荒地	耕地	退耕地
容重(g/cm ³)	1.22 ± 0.01 b	1.30 ± 0.03 a	1.37 ± 0.03 a	1.33 ± 0.01 a
田间持水量(%)	27.28 ± 0.38 a	22.81 ± 1.05 b	21.06 ± 0.81 b	23.14 ± 0.12 b
总孔隙度(%)	46.46 ± 0.29 a	43.96 ± 1.11 ab	37.05 ± 1.20 c	41.23 ± 0.28 b
毛管孔隙度(%)	33.09 ± 0.31 a	28.89 ± 0.8 b	29.55 ± 1.39 b	30.62 ± 0.36 ab
非毛管孔隙度(%)	13.47 ± 0.19 a	14.44 ± 1.28 a	8.44 ± 0.68 b	10.72 ± 0.68 b
pH	8.48 ± 0.08 ab	8.31 ± 0.07 ab	8.29 ± 0.05 b	8.50 ± 0.04 a
电导率(mS/cm)	0.97 ± 0.45 b	1.11 ± 0.30 b	0.71 ± 0.11 b	3.10 ± 0.35 a
可溶性盐(g/kg)	3.03 ± 1.27 b	3.14 ± 0.82 b	2.29 ± 0.24 b	9.27 ± 0.94 a
有机质(g/kg)	10.88 ± 1.76 a	12.73 ± 3.05 a	10.93 ± 0.96 a	13.36 ± 0.69 a
碱解氮(mg/kg)	41.32 ± 7.99 a	43.27 ± 9.40 a	52.42 ± 3.03 a	53.06 ± 1.16 a
全氮(g/kg)	0.60 ± 0.10 a	0.73 ± 0.19 a	0.64 ± 0.05 a	0.76 ± 0.04 a
全磷(g/kg)	0.60 ± 0.06 b	0.72 ± 0.03 a	0.77 ± 0.04 a	0.77 ± 0.02 a
全钾(g/kg)	19.97 ± 0.58 a	21.01 ± 0.83 a	19.78 ± 0.32 a	20.45 ± 0.23 a
有效磷(mg/kg)	10.14 ± 3.14 b	9.53 ± 2.51 b	28.20 ± 3.62 a	28.03 ± 2.60 a
速效钾(mg/kg)	195.28 ± 34.42 a	223.38 ± 49.15 a	132.10 ± 17.26 a	188.18 ± 10.80 a
铵态氮(mg/kg)	4.04 ± 0.16 b	4.14 ± 0.58 b	3.67 ± 0.08 b	5.19 ± 0.26 a
硝态氮(mg/kg)	11.87 ± 4.8 a	14.58 ± 7.37 a	23.38 ± 7.90 a	20.22 ± 2.93 a

注: 表中同行不同小写字母表示同一指标在不同用地类型之间差异显著($P<0.05$)。

2.3 土壤理化性质指标之间的相关性

对银川市黄河滩地土壤理化性质进行相关性分析(表 6), 结果表明, 研究区土壤容重与其余土壤物理性质呈现不同程度的负相关关系, 与总孔隙度的相关系数最大, 达 -0.827。田间持水量与总孔隙度、毛管孔隙度呈极显著正相关($P<0.01$), 与非毛管孔隙度相关性不显著, 与毛管孔隙度的相关系数最大达 0.817。总孔隙度与毛管孔隙度、非毛管孔隙度呈极显著正相关($P<0.01$), 这与其定义相符。非毛管孔隙度与 pH、电导率、可溶性盐含量呈不同程度负相关, pH、电导率、可溶性盐含量之间呈极显著正相关($P<0.01$)。有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾含量之间呈现不同程度的正相关性, 有机质与全氮相关系数最大达 0.941, 其次分别是全氮与碱解氮为 0.816, 有机质与碱解氮为 0.813, 表明有机质、全氮、碱解氮的积累有高度同步性。碱解氮同硝态氮、铵态氮含量呈极显著正相关($P<0.01$), 这与其定义相符。

2.4 土壤理化性质空间变异及分布特征

半方差函数是分析研究区内变量空间变异结构的重要工具, 在 GS+9.0 中进行半方差变异函数拟合, 根据残差平方和最小、相关系数最大的原则确定最优半方差函数模型及其参数。银川市黄河滩地土壤各性状的最优半方差函数模型及参数见表 7。田间持水量、非毛管孔隙度、可溶性盐、碱解氮、全钾、铵态氮符合指数模型, 毛管孔隙度、电导率和硝态氮符合高斯模型, 其他理化性质均符合球形模型。pH 的块金值/基台值比值在 25% ~ 75%, 推测在自然因素和人为因素的共同作用下表现出中等的空间自相关性, 其余土壤理化性质的块金值/基台值比值均大于 75%, 可以推断随机因素是导致其空间异质性的主要原因。土壤理化性质的变程范围为 120 ~ 6 770 m, 各土壤性状的空间自相关范围存在较大差异, 除容重、田间持水量、总孔隙度、硝态氮、铵态氮的变程小于取样间距外, 其余各项土壤肥力的变程均大于取样间

表 6 土壤理化性质之间的相关系数
Table 6 Correlation coefficients among soil physiochemical properties

	容重	田间持水量	总孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	pH	电导率	可溶性盐	有机质	碱解氮	全氮	全磷	全钾	有效磷	速效钾	铵态氮	硝态氮	
田间持水量	-0.786**																	
总孔隙度	-0.827**	0.783**																
毛管孔隙度	-0.300*	0.817**	0.472**															
非毛管孔隙度	-0.701**	0.275	0.767**	-0.203														
pH	0.21	-0.028	-0.239	0.159	-0.381**													
电导率	0.155	-0.014	-0.259	0.103	-0.363*	0.522**												
可溶性盐	0.143	-0.013	-0.26	0.099	-0.360*	0.512**	0.968**											
有机质	-0.167	-0.03	0.033	-0.199	0.182	-0.144	0.304*	0.241										
碱解氮	-0.225	0.089	0.006	-0.083	0.067	-0.223	0.388**	0.333*	0.813**									
全氮	-0.159	-0.034	0.037	-0.202	0.188	-0.243	0.268	0.23	0.941**	0.816**								
全磷	-0.052	-0.128	-0.11	-0.247	0.058	-0.290*	0.21	0.159	0.763**	0.775**	0.782**							
全钾	-0.043	-0.149	-0.01	-0.277	0.19	-0.274	-0.115	-0.103	0.516**	0.323*	0.558**	0.300*						
有效磷	0.097	-0.154	-0.292*	-0.159	-0.209	-0.001	0.548**	0.501**	0.556**	0.698**	0.528**	0.776**	0.026					
速效钾	-0.285*	0.226	0.212	0.061	0.191	-0.026	0.298*	0.252	0.568**	0.524**	0.557**	0.369**	0.433**	0.328*				
铵态氮	-0.208	0.043	0.089	-0.139	0.199	0.122	0.339*	0.330*	0.271	0.375**	0.276	0.240	0.051	0.192	0.141			
硝态氮	-0.024	-0.084	-0.119	-0.189	0.004	-0.292*	0.111	0.152	0.245	0.399**	0.388**	0.458**	0.328*	0.376**	0.209	0.255		

表 7 土壤理化性质半方差函数理论模型及其相关参数
Table 7 Theoretical models of semi-covariance function of soil physiochemical properties and related parameters

理化性质	理论模型	块金值	基台值	变程	块金值/基台值	决定系数	残差平方和
容重	球状模型	0.014 6	0.118 2	1 450	87.6	0.355	5.58×10^{-3}
田间持水量	指数模型	1.3	9.12	120	85.7	0.168	25.7
总孔隙度	球状模型	0.95	13.94	1 450	93.2	0.302	96.6
毛管孔隙度	高斯模型	1.42	6.277	2 684.68	77.4	0.125	25.7
非毛管孔隙度	指数模型	2.07	11.77	4 560	82.4	0.161	69.5
pH	球状模型	0.017 4	0.058 8	6 770	70.4	0.494	7.35×10^{-4}
电导率	高斯模型	0.157	1.040	2 702	84.9	0.380	0.132
可溶性盐	指数模型	0.147	0.970	4 410	84.8	0.517	0.0615
有机质	球形模型	2.200	28.740	2 720	92.3	0.083	322
碱解氮	指数模型	49	366.9	2 940	86.6	0.100	30 486
全氮	球形模型	0.008 5	0.112	2 440	92.4	0.040	5.34×10^{-3}
全磷	球形模型	0.063	1.055	2 480	94.0	0.219	0.081 3
全钾	指数模型	0.000 1	0.001 27	2 130	92.1	0.054	1.91×10^{-7}
有效磷	球形模型	7.5	208.6	2 110	96.4	0.041	4 778
速效钾	球状模型	0.002 7	0.042 7	2 230	93.7	0.043	3.28×10^{-4}
铵态氮	指数模型	0.077	0.887	1 440	91.2	0.040	0.147
硝态氮	高斯模型	0.039 3	0.205 6	467.65	80.9	0.051	4.07×10^{-3}

距,因此在分析滩地土壤物理性质和无机态氮时可以适当地增加采样点数、减少采样面积。

为了更直观反映各项理化性质的空间分布特征,根据 Kriging 插值法用 ArcGIS 绘制空间分布图。从空间分布图(图 2)可以看出,田间持水量、总孔隙度

和非毛管孔隙度在空间上的总体分布表现为研究区上游偏大,下游偏小;容重、pH、电导率和可溶性盐、有效磷含量在空间上的分布特征为上游偏低,下游偏高;其余土壤理化性质在空间上呈现斑块状分布,无明显分布格局。

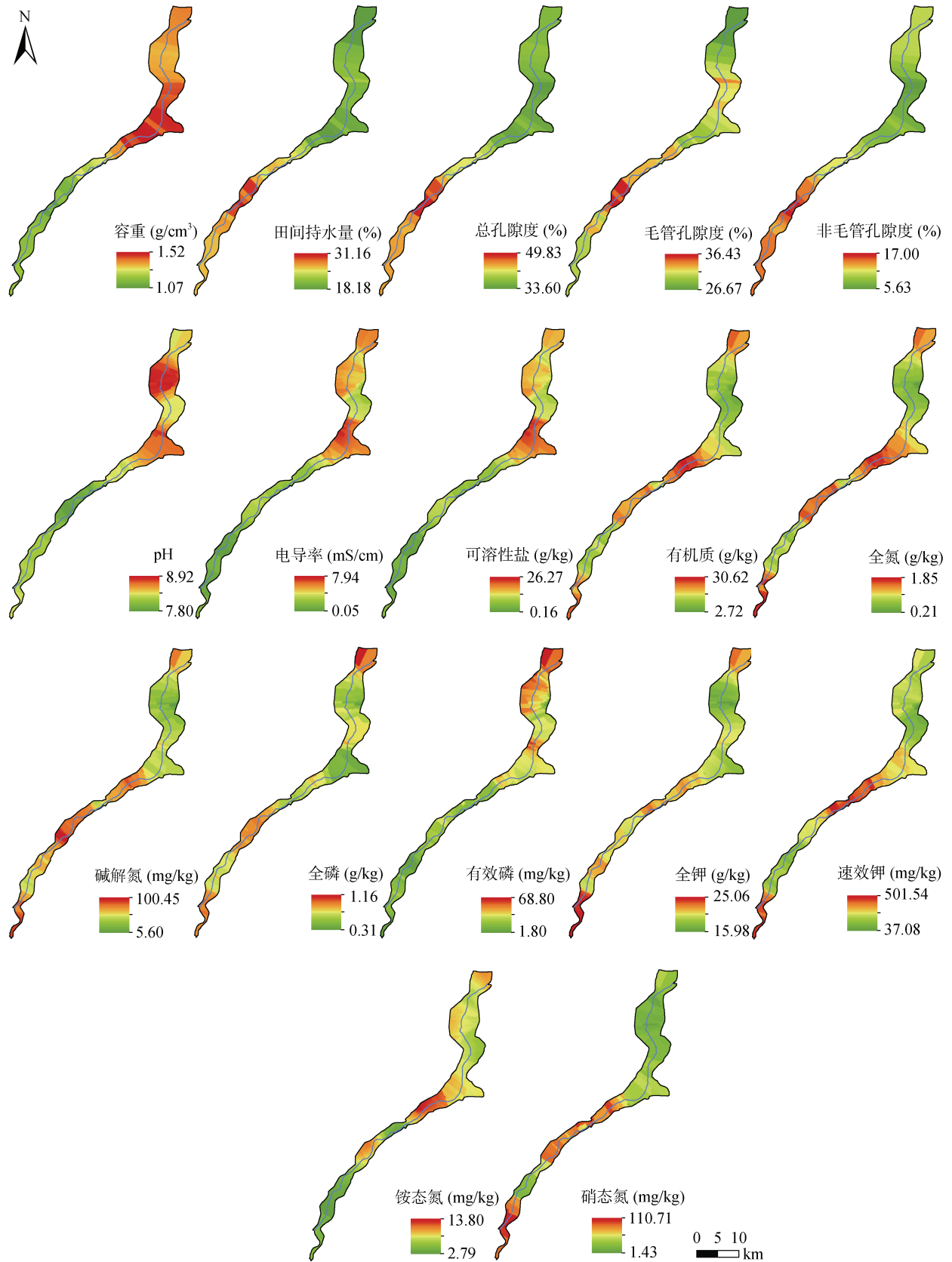


图 2 土壤理化性质空间分布图
Fig. 2 Spatial distribution of soil physicochemical properties

2.5 土壤肥力质量综合评价

根据模糊数学中的加乘法原则,基于各项土壤质量评价指标的权重系数和隶属度值计算土壤肥力综合指数 IFI,结果(表 8)表明,研究区 IFI 在 0.28~0.84,平均值为 0.46,IFI 的变异系数为 20%,属于中等变异。图 3 为利用各项土壤质量评价指标对应的平均隶属度值绘制的雷达图,反映了各项评价指标的状态和研究区整体土壤肥力水平。从各指标在坐标轴上的位置看,pH 的平均隶属度值最小,约为 0.23,其次为硝态氮和铵态氮,平均值约为 0.24,说明 pH、硝态氮和铵态氮是本研究区土壤质量的限制因子。从总体上看,各项评价指标构成的多边形面积较小,说明银川市黄河滩地的土壤肥力偏低。

表 8 IFI 描述性统计
Table 8 Descriptive statistics of soil IFI

项目	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数(%)
IFI	0.28	0.84	0.46	0.09	20

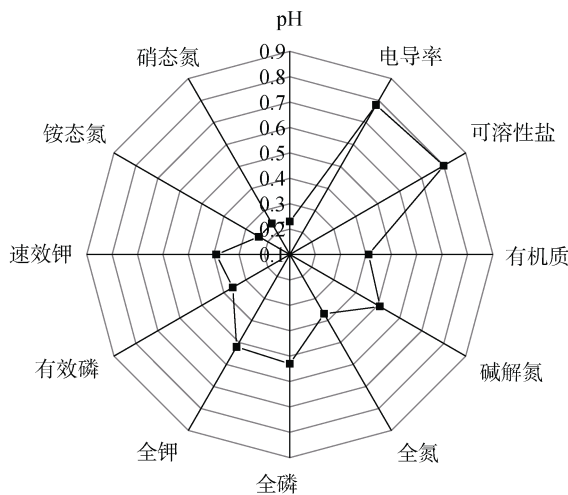


图 3 各指标隶属度均值雷达图

Fig. 3 Radar plot of membership function values of soil evaluation indicators

参考研究区土壤质量特征,以 IFI 值为依据,根据等距法将研究区肥力划分为 4 个等级,IFI>0.7 为 I 级,0.5~0.7 为 II 级,0.3~0.5 为 III 级,<0.3 为 IV 级(表 9)。I 级样点占比最低仅为 1.08%,III 级样点占比最高为 65.21%。通过 IFI 值的空间分布图(图 4)可以看出,其在空间上呈现出上游偏大、下游偏小的分布特征。对研究区不同用地类型 IFI 值进行单因素方差分析,结果表明不同用地类型之间差异不显著($P>0.05$)。

3 讨论

通常认为,土壤容重介于 1.0~1.5 g/cm³,总孔

表 9 土壤肥力等级划分及占比
Table 9 Classification and proportion of soil integrated fertility index (IFI)

IFI	>0.7	0.5~0.7	0.3~0.5	<0.3
肥力水平	优	良好	中等	差
肥力等级	I	II	III	IV
比例(%)	1.08	28.26	65.21	5.43

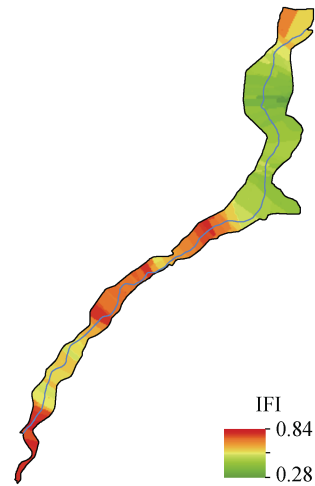


图 4 IFI 空间分布图

Fig. 4 IFI spatial distribution

隙度在 50% 左右,非毛管孔隙占 20%~40% 时,土壤透水性、通气性和持水能力比较协调,对植物生长最适宜^[20]。本研究结果表明,银川市黄河滩区表层土壤总体具有良好的物理特征,容重和孔隙度特征对植物生长较适宜,田间持水量在宁夏全区土壤田间持水量 9.5%~36.9% 范围之内^[21]。根据全国第二次土壤普查标准^[19],研究区土壤为盐碱土,氮、磷元素含量偏低,其余养分指标含量处于中上水平。研究区气候干旱,降水量小,蒸发强烈,使土壤可溶性盐积聚于表层形成盐碱土。

研究区不同用地类型之间,林地的容重(1.22 g/cm³)显著低于其他用地类型,田间持水量和孔隙度特征表现出相反趋势。原因是林地中的植被根系相对发达,导致其地下生物量大,依赖于根系生存的各种土壤微生物和动物的生命活动较为旺盛,因此土壤更为疏松,土壤容重显著低于其他用地类型,总孔隙度和田间持水量显著高于其他用地类型;而耕地由于人为耕作造成土壤板结,在一定程度上通透性不良,导致土壤小孔隙占比较大,从而导致容重偏大和田间持水量偏小。耕地与退耕地之间,除土壤总孔隙度外,其余物理性质差异均不显著,这是由于退耕之后,人为活动较少,加之生态系统本身的恢复力和稳定性,使得土壤物理性质得到了一定程度的改善,但由于围封退耕

的时间较短,生态自然恢复缓慢,地上植被较少,土壤物理性质受退耕前的人为活动和土质影响,其土壤物理性质尚未得到较大程度改善^[22]。耕地土壤 pH 最低且显著低于退耕地,而退耕地的电导率和可溶性盐含量显著高于其他用地类型,这是由于耕地中大量使用化肥,而硫酸铵、氯化钾、氯化铵等都属于生理性酸性肥料,肥料中的 NH_4^+ 和 K^+ 在被作物吸收之后,硫酸根、氯离子等残留在土壤中,而氮肥中的铵态氮在土壤中进行硝化作用也会产生酸,导致土壤的酸化,从而降低了耕地土壤的盐碱程度^[23]。林地的全磷含量显著低于其他用地类型,有效磷含量显著低于耕地和退耕地,是由于林地植物比其他植物拥有更强的吸收磷元素的能力^[24]。退耕地铵态氮含量显著高于其他用地类型,是由于退耕初期土壤铵态氮因耕作土中作物根系腐烂以及植物养分消耗降低而出现的增加趋势^[25]。

土壤理化性质相关性分析发现,研究区土壤理化性质之间呈现不同程度的相关性。土壤孔隙度特征显著影响土壤容重和田间持水量,总孔隙度显著影响土壤容重,毛管孔隙度对田间持水量影响较大,这与汪言在等^[26]的结论相符。土壤非毛管孔隙度与 pH、电导率、可溶性盐含量呈负相关,说明土壤小孔隙越少,土壤毛管水分蒸发量越大,导致表层土壤盐分积累,同时研究区均为碱性土壤,随着盐分的累积, Ca^{2+} 、 Na^+ 等盐基离子相对比例增加,导致其 pH 上升。各养分含量之间呈不同程度的正相关,有机质与全氮、碱解氮含量有高度同步性。

研究区土壤物理性质的空间分布特征容重表现为上游偏小、下游偏大,土壤孔隙度和田间持水量则与之相反。上游采样点多为林地,土壤疏松,下游样点则为土质尚未完全改良的退耕地,且研究表明河流滩地从上游到下游土壤颗粒出现细化^[27],导致土壤孔隙减小,容重变大,田间持水量逐渐变小。

pH 的空间分布格局由结构因素和随机因素共同作用,其余理化性质主要受随机因素的影响。土壤 pH、电导率和可溶性盐含量空间分布特征基本一致。黄河下游多为退耕地,上游两岸多是林地和耕地,人为的土壤改良、耕作施肥使研究区上游盐碱程度偏小;下游黄河西岸为退耕地,东岸为林地和耕地,导致下游东岸部分样点盐碱程度明显低于西岸而出现对称性不一致。

土壤有机质、全氮和碱解氮含量在空间上的分布相似。有机质、全氮含量与植被覆盖状况关系密切,

不同土地利用方式、管理措施、凋落物量的差异导致土壤有机质输入存在差异^[28]。研究区黄河上游入境处多为林地、小麦地以及玉米退耕地,中上游和中下游为小麦地、人工种苗场,黄河出境处多为玉米、大豆退耕地,人为种植、施肥、灌溉、秸秆还田等措施导致其有机质积累较多,有机质与土壤全碳、全氮关系较为紧密^[29],同时碳、氮含量的积累具有耦合作用,导致有机质与氮分布具有高度同步性。铵态氮含量在黄河两岸呈现不一致,表现为西岸更高,主要是由于西岸为退耕地,东岸为其他用地类型,退耕地在耕作时施加的氮肥中的铵为正电荷,而土壤为负电荷,铵态氮易被土壤胶体吸附而不易淋失,并且退耕后作物根系腐烂以及植物吸收量降低也导致铵态氮的增加。

土壤全磷和有效磷含量呈极显著相关,但在空间上部分地区分布特征相反。研究区上游多为林地和耕地,施肥较多,地上植物多样,作物生长吸收量大,因而土壤呈现出全磷多、有效磷少的情况;下游多为退耕地,部分样点未退耕时投入磷素一部分被吸附固定在土壤中^[30],地上植被较少,吸收量较低,致使土壤全磷含量偏低,但有效磷含量相对较丰富。全钾和速效钾空间分布关系同全磷和有效磷的分布特征相似,均受施肥、土地利用类型、地上植被吸收的影响,在研究区部分区域出现二者空间分布特征相反的格局。

根据土壤综合肥力指数的等级划分,研究区土壤质量处于中等水平,但从平均值看, $\text{IFI} < 0.5$,说明研究区整体土壤质量处于中下水平,与李百云等^[31]对宁夏地区耕地质量的研究结果相似。通过土壤质量评价指标平均隶属度雷达图得出,制约银川市黄河滩地土壤质量的因子主要是土壤 pH 和无机态氮。土壤 pH 是土壤的重要化学性质,直接影响土壤中各种养分元素的存在形式和对植物的有效性^[32];无机态氮是植物能够直接吸收利用的氮素,研究区全氮含量偏低,能够被微生物矿化利用的氮素来源较少,加之滩地沉积黄河泥沙,表层土壤多为砂土,易造成硝态氮的淋失,从而影响土壤整体质量。针对研究区土壤质量制约因子,要注重土壤碱化问题,及时调整耕作方式,投入氮肥以提高整体土壤质量。

掌握土壤理化指标的空间分布规律,精准施肥,是恢复植被生态的关键。研究区范围较大,影响土壤理化性质空间分布的因素有很多,对于其空间分布还需深入研究。本文仅通过影响土壤质量的 pH、含盐量和养分指标进行综合评价,但要想全面、细致地掌

握区域土壤质量状况还应对其微生物及重金属特征加以研究。

4 结论

银川市黄河滩地表层土壤物理特征良好,土壤均为盐碱土,氮、磷养分含量偏低,有机质、钾养分含量处于中等水平。不同用地类型之间,林地的物理性质表现最优,化学性质差异不显著。各理化性质间相关性较强,孔隙特征对土壤容重、田间持水量、pH 以及可溶性盐含量影响较大,有机质与全氮、碱解氮含量高度同步。容重、pH、电导率、可溶性盐含量、有效磷含量在空间上的分布特征为上游偏小、下游偏大,田间持水量、总孔隙度和非毛管孔隙度在空间上的总体分布表现为上游偏大、下游偏小。研究区土壤综合肥力指数偏低,土壤 pH 和无机态氮是土壤肥力的制约因子。

参考文献:

- [1] 李增辉, 张文, 刘峰, 等. 努力建设黄河流域生态保护和高质量发展先行区(沿着总书记的足迹·宁夏篇)[N]. 人民日报, 2022-06-26(8).
- [2] Pander J, Knott J, Mueller M, et al. Effects of environmental flows in a restored floodplain system on the community composition of fish, macroinvertebrates and macrophytes[J]. *Ecological Engineering*, 2019, 132: 75–86.
- [3] 许景伟, 李传荣, 夏江宝, 等. 黄河三角洲滩地不同林分类型的土壤水文特性[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(1): 173–176.
- [4] 吕圣桥. 黄河三角洲滩地土壤颗粒分形特征及其与土壤性质的相关性研究[D]. 泰安: 山东农业大学.
- [5] 周学峰, 赵睿, 李媛媛, 等. 围垦后不同土地利用方式对长江口滩地土壤粒径分布的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29(10): 5544–5551.
- [6] Jin Y, Wang X Y, Dong Y P. Variation of water quality in Ningxia section of the Yellow River in recent 5 years[J]. *Journal of Chemistry*, 2022: 7704513.
- [7] Shen W B, Hu Y, Zhang J, et al. Spatial distribution and human health risk assessment of soil heavy metals based on sequential Gaussian simulation and positive matrix factorization model: A case study in irrigation area of the Yellow River[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 225: 112752.
- [8] Zhang M, Wang X P, Liu C, et al. Identification of the heavy metal pollution sources in the rhizosphere soil of farmland irrigated by the Yellow River using PMF analysis combined with multiple analysis methods—using Zhongwei city, Ningxia, as an example[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2020, 27(14): 16203–16214.
- [9] 邓丽, 陈玉春, 李光伟, 等. 宁夏引黄灌区土壤盐渍化影响因素调查分析[J]. *中国农村水利水电*, 2007(11): 46–47, 51.
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [12] 张英利, 许安民, 尚浩博, 等. 连续流动分析仪测定土壤硝态氮和有效磷的试验及改进[J]. *中国土壤与肥料*, 2008(2): 77–80.
- [13] Oerter E J, Bowen G J. Spatio-temporal heterogeneity in soil water stable isotopic composition and its ecohydrologic implications in semiarid ecosystems[J]. *Hydrological Processes*, 2019, 33(12): 1724–1738.
- [14] 陶睿, 王子芳, 高明, 等. 重庆市丰都县紫色土养分空间变异及土壤肥力评价[J]. *土壤*, 2017, 49(1): 155–161.
- [15] 骆伯胜, 钟继洪, 陈俊坚. 土壤肥力数值化综合评价研究[J]. *土壤*, 2004, 36(1): 104–106, 111.
- [16] 郑立臣, 宇万太, 马强, 等. 农田土壤肥力综合评价研究进展[J]. *生态学杂志*, 2004, 23(5): 156–161.
- [17] 王建国, 杨林章, 单艳红. 模糊数学在土壤质量评价中的应用研究[J]. *土壤学报*, 2001, 38(2): 176–183.
- [18] 孙绪博, 张宏凯, 孙婴婴. 基于模糊数学模型的沿黄河滩地土壤质量综合评价——以韩城市下峪口为例[J]. *环境工程*, 2017, 35(增刊 2): 531–535.
- [19] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查技术[M]. 北京: 农业出版社, 1992.
- [20] Orzech K, Wanic M, Załuski D. The effects of soil compaction and different tillage systems on the bulk density and moisture content of soil and the yields of winter oilseed rape and cereals[J]. *Agriculture*, 2021, 11(7): 666.
- [21] 高学芳, 孙超, 包淑萍. 测定土壤田间持水量的环刀法改进研究[J]. *宁夏工程技术*, 2019, 18(4): 347–349.
- [22] 邹文秀, 韩晓增, 陆欣春, 等. 不同土地利用方式对黑土剖面土壤物理性质的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(5): 187–193, 199.
- [23] 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.
- [24] Takahashi Y, Katoh M. Root response and phosphorus uptake with enhancement in available phosphorus level in soil in the presence of water-soluble organic matter deriving from organic material[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 322: 116038.
- [25] Holmes K W, Kyriakidis P C, Chadwick O A, et al. Multi-scale variability in tropical soil nutrients following land-cover change[J]. *Biogeochemistry*, 2005, 74(2): 173–203.
- [26] 汪言在, 苏正安, 周明华. 北方农牧交错带表层土壤孔隙度特征及其影响因素[J]. *草业科学*, 2020, 37(7): 1249–1258.

- [27] 张琦, 夏继红, 汪颖俊, 等. 基于分形维数的中小河流滩地沉积物空间分布研究[J]. 水土保持研究, 2019, 26(2): 366–369, 376.
- [28] 吕真真, 刘广明, 杨劲松, 等. 环渤海沿海区域土壤养分空间变异及分布格局[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 944–952.
- [29] 张文敏, 姜小三, 吴明, 等. 杭州湾南岸土壤有机碳空间异质性研究[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 1087–1095.
- [30] 童珊, 曹广超, 张卓, 等. 土壤全碳全氮空间异质性及影响因素分析——以祁连山南坡黑河上游为例[J]. 土壤, 2022, 54(5): 1064–1072.
- [31] 李白云, 李慧, 郭鑫年, 等. 基于最小数据集的宁夏耕地土壤质量评价[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(9): 195–201.
- [32] Hong S B, Gan P, Chen A P. Environmental controls on soil pH in planted forest and its response to nitrogen deposition[J]. Environmental Research, 2019, 172: 159–165.