

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2024.02.008

曹涛, 周蓓蓓, 吴山山, 等. 白鹤滩水电站项目区土壤肥力评价及其空间变异. 土壤, 2024, 56(2): 300–308.

白鹤滩水电站项目区土壤肥力评价及其空间变异^①

曹涛¹, 周蓓蓓^{1*}, 吴山山¹, 赵宇航¹, 崔磊², 夏振尧⁴, 任远³, 姚少雄¹

(1 西安理工大学西北旱区生态水利工程国家重点实验室, 西安 710048; 2 水利水电规划设计总院, 北京 100120; 3 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 长沙 410014; 4 三峡库区地质灾害教育部重点实验室(三峡大学), 湖北宜昌 443002)

摘要: 采用地统计学、地理信息系统(GIS)和模糊数学等方法, 系统地调查分析了白鹤滩水电站项目区土壤肥力状况及其空间变异特征。结果显示: 研究区碱解氮和有效磷具有较强的空间变异性, 有机质和速效钾的空间变异性为中等水平, 而阳离子交换量和细菌群落 α 多样性 Chao1 指数的空间变异性最小, 为较弱水平。在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层土壤碱解氮、有机质、阳离子交换量、速效钾、速效磷和 Chao1 指数的平均值分别为 14.08 mg/kg、14.02 g/kg、8.04 cmol/kg、98.53 mg/kg、0.65 mg/kg、0.97 和 12.14 mg/kg、12.70 g/kg、8.02 cmol/kg、109.78 mg/kg、0.74 mg/kg、0.93。其中, 碱解氮和速效磷的平均含量低于土壤养分分级标准的 6 级水平, 而有机质含量和阳离子交换量处于 4 级水平, 速效钾含量处于 3 级水平。10~20 cm 土层速效钾在空间上呈现较弱的自相关性, 而碱解氮、有机质、阳离子交换量、0~10 cm 土层 Chao1 指数和 10~20 cm 土层速效磷块金系数均小于 25%, 在空间上呈现较强的自相关性。通过空间插值图可以看出, 研究区土壤综合肥力指标、碱解氮和有机质呈现由西北向东南逐渐降低的趋势, 而其他肥力指标则具有不同的空间分布特征。研究区整体土壤肥力水平较低, 其中速效磷和碱解氮是主要的限制因素。

关键词: 白鹤滩; 土壤肥力; 空间变异; 主成分分析法; 模糊综合评价

中图分类号: S158 文献标志码: A

Assessment of Soil Fertility and Spatial Variation in Project Area of Baihetan Hydropower Station

CAO Tao¹, ZHOU Beibei^{1*}, WU Shanshan¹, ZHAO Yuhang¹, CUI Lei², XIA Zhenyao⁴, REN Yuan³, YAO Shaoxiong¹

(1 State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2 General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design, Beijing 100120, China; 3 PowerChina Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha 410014, China; 4 Key Laboratory of Geological Hazards in Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: Geostatistics, GIS, and fuzzy mathematics methods were used in this study to systematically investigate and analyze soil fertility status and its spatial variability characteristics in the Baihetan hydropower project area. The results showed that available nitrogen (AN) and rapid available phosphorus (RAP) had strong spatial variability, organic matter (OM) and rapid available potassium (RAK) had moderate spatial variability, while cation exchange capacity (CEC) and bacterial community α diversity index (Chao1) variation coefficients were the smallest and had weak spatial variability. The average values of AN, OM, CEC, RAK, RAP and Chao1 were 14.08 mg/kg, 14.02 g/kg, 8.04 cmol/kg, 98.53 mg/kg, 0.65 mg/kg and 0.97 in 0–10 cm depth, 12.14 mg/kg, 12.70 g/kg, 8.02 cmol/kg, 109.78 mg/kg, 0.74 mg/kg and 0.93 in 10–20 cm depth, respectively. The average contents of AN and RAP were lower than the 6th levels, OM and CEC were at the 4th levels, and RAK was at the 3rd level of soil property classification standard. 10–20 cm RAK showed weak spatial autocorrelation, while AN, OM, CEC, 0–10 cm Chao1, and 10–20 cm RAP had nugget coefficients less than 25% and showed strong spatial autocorrelation. Integrated soil fertility index (IFI), AN and OM gradually decreased from northwest to southeast, while other fertility indicators had different spatial distribution characteristics. In conclusion, the overall soil fertility level was low in the study area, with RAP and AN as the main limiting factors.

Key words: Baihetan; Soil fertility; Spatial variability; Principal component analysis; Fuzzy comprehensive evaluation

①基金项目: 中国三峡建设管理有限公司科研项目(BHT/0869)资助。

* 通讯作者(happyanle222@aliyun.com)

作者简介: 曹涛(1998—), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生, 主要从事植物抗逆性研究。E-mail: 15102711614@163.com

水利水电工程建设在国家防洪、发电、供水、水上运输以及民生发展等多个领域都具有重大意义^[1]。但水利水电工程建设不可避免对周围生态环境造成一定影响。随着我国对生态环保工作越来越重视,相关部门积极主动开展水土保持生态修复措施以减小水利水电工程给生态环境带来的不利影响,确保水利水电工程能够与生态环境和谐相处,创造更大更持久的效益。

在水利水电建设项目的水土保持生态修复工程中,表土资源利用、植被修复以及高陡边坡治理均需首先考虑项目区域土壤质量,因地制宜开展相关生态修复技术。土壤肥力是土壤的本质属性和其各种性质的综合表现^[2]。科学合理开展水利水电工程建设项目的土壤肥力状况调查与分析是植被恢复、生态整治的重要前提。由于水利水电工程项目涉及面积大、土壤类型及植被类型复杂多变,采取科学合理的方法进行土壤肥力评价与空间变异分析,对水土保持生态修复分区治理、因地制宜具有重要指导意义。

近年来,大量国内外学者采用地统计学和地理信息系统(GIS)两种技术相结合研究了土壤性质的空间变异特征。如杨树明等^[3]应用地理信息系统和地统计学研究了曲靖市烟田土壤养分的空间变异特征。文春玉等^[4]基于地统计学技术明确了研究区土壤养分空间变异的合理采样方法。土地利用类型和研究尺度的不同,都会影响土壤养分空间变异规律的预测^[5]。王幼奇等^[6]研究发现土壤养分的小尺度空间变异规律会因研究尺度过大而被掩盖。目前,大量研究的对象多为耕地、城郊或林地,而对于水利水电工程项目区

的土壤肥力评价及其养分空间变异的研究较为缺乏。白鹤滩水电站所在的金沙江干热河谷,是云南省典型的生态脆弱区,其极端温度频发,旱季持续时间长,导致施工结束后生态修复困难^[7]。由此,本研究利用地统计学与 GIS 相结合的方法,采用精细坐标定点采样,以白鹤滩水电站工程区土壤为对象,分析小尺度下土壤养分的空间分异特征,并对其土壤综合肥力进行评价,为金沙江干热河谷水利水电工程项目区水土保持与生态恢复提供科学建议。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省巧家县白鹤滩水电站建设区,地理坐标 $112^{\circ}52'E \sim 112^{\circ}56'E$ 和 $27^{\circ}10'N \sim 27^{\circ}16'N$ (图 1),属于亚热带高原立体气候,年均气温 $21.1^{\circ}C$,年均降水量为 801.2 mm ,土壤类型以砖红壤及红壤为主。该区是云南省干热河谷植被区的常见类型,植被为河谷稀树灌草丛,其分布受降水影响垂直分布差异明显^[8]。由于长期的人为破坏及工程措施影响,研究区水土流失严重,植被出现不同程度退化。

1.2 样品采集与分析

根据研究区的土地利用现状、地形地貌和植被情况,以及代表性和均匀性等原则,结合遥感影像图和 GPS 定位(图 1),于 2021 年 6 月按标准样方法布设 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 土壤样方,在样方内分两层($0 \sim 10\text{ cm}$ 和 $10 \sim 20\text{ cm}$)采集土样共 100 个,混合后用四分法保留 1 kg 装袋。将样品去除杂质后自然风干,研磨过 20 目和 100 目筛后装入自封袋,用冰盒保存备用。

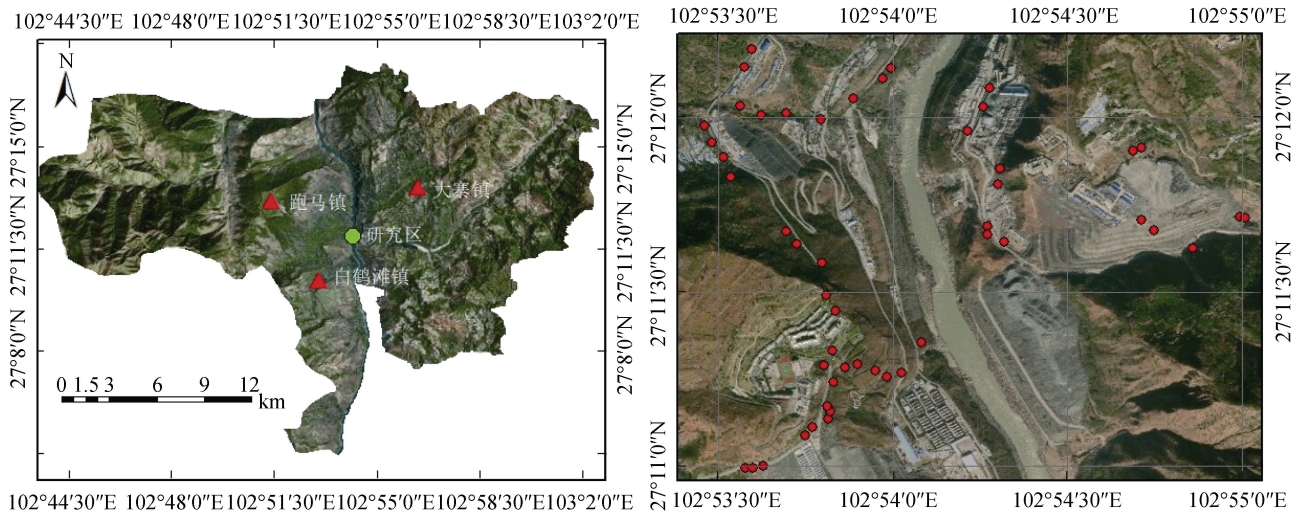


图 1 研究区地理位置(左)及采样点分布(右)

Fig. 1 Location of study area (left) and sampling sites (right)

基于前人相关研究^[9-12],选取土壤碱解氮、有机质、阳离子交换量(CEC)、速效钾、速效磷作为土壤肥力指标,测定方法参照《土壤农化分析》^[13]。通过相关性分析,选取 Chao1 指数代表土壤细菌群落多样性指数,其通过 Illumina 高通量测序技术测定。

1.3 评价方法

1.3.1 土壤肥力指标及权重确定 土壤肥力是土壤在供应植物生理所需物质时所处环境条件和土壤养分状况两者的有机结合^[14]。细菌是土壤中最丰富的一类微生物,作用强度和影响最大^[15]。土壤细菌对维持土壤质量、促进植物生长具有重要意义。表 1 为各土壤养分和细菌群落多样性指数的相关性分析。Chao1 指数用于估算样品中所含的操作性分类单元(OTU)总数,反映了菌群丰度,Chao1 指数越大,说明细菌群落丰度越高;Shannon 指数和 Simpson 指

数反映细菌群落的 α 多样性,其中 Shannon 指数越大,说明细菌群落的多样性越高^[16]。由表 1 数据可知,研究区土壤细菌群落多样性指数与土壤养分指标的相关性普遍偏低,但多样性指数之间均显著性相关,相关系数均大于 0.85,因此,本研究选取平均相关系数最大的 Chao1 指数作为肥力指标,代表 4 个多样性指数。

因土壤因子对肥力的贡献和作用较为复杂,不同学者确定各项指标权重的方法也不尽相同,如主成分分析法^[17]、专家评分法^[18]、层次分析法^[19]和相关系数法^[20]。本研究采用相关系数法,以获得客观权重^[21]。首先计算出土壤各肥力指标之间相关系数(表 1)及对应指标与其他指标相关系数的均值,以该均值占土壤全部肥力指标间相关系数均值之和的比作为该项指标的权重系数^[22](表 2)。

表 1 土壤肥力指标间的相关系数
Table 1 Correlation coefficients between soil fertility indicators

土层(cm)	肥力指标	碱解氮	有机质	CEC	速效钾	速效磷	Shannon	Simpson	Chao1	ACE
0~10	碱解氮	1								
	有机质	0.883**	1							
	CEC	0.099	0.179	1						
	速效钾	-0.17	-0.284*	0.045	1					
	速效磷	0.079	0.158	-0.011	-0.141	1				
	Shannon	-0.006	0.027	-0.028	-0.016	0.033	1			
	Simpson	0.015	0.034	-0.007	0.013	0.019	0.988**	1		
	Chao1	0.007	-0.021	0.017	0.063	-0.042	-0.991**	-0.965**	1	
	ACE	0.011	0.014	-0.021	0.015	-0.012	0.914**	0.959**	-0.870**	1
10~20	碱解氮	1								
	有机质	0.929**	1							
	CEC	0.248	0.207	1						
	速效钾	-0.032	-0.287*	0.08	1					
	速效磷	0.288*	0.288*	-0.061	0.03	1				
	Shannon	-0.015	0.021	-0.008	-0.015	0.026	1			
	Simpson	0.092	0.011	-0.021	0.005	0.012	0.956**	1		
	Chao1	0.011	0.036	0.025	-0.062	-0.053	-0.942**	-0.893**	1	
	ACE	0.023	0.041	-0.022	0.013	-0.053	0.921**	0.932**	-0.862**	1

注: * 表示在 $P<0.05$ 水平(双尾)显著相关; ** 表示在 $P<0.01$ 水平(双尾)显著相关。

1.3.2 肥力指标隶属度函数确定 根据土壤肥力指标与作物生长效应曲线可将隶属度函数模型分为 S 型和抛物线型两种^[23]。参照文献^[24-26]并结合研究区土壤养分状况,碱解氮含量、土壤有机质含量、CEC、速效钾含量、速效磷含量及细菌多样性均对土壤质量有正效应,采用 S 型隶属函数(公式(1))。

$$f(x) = \begin{cases} 1.0 & x \geq x_2 \\ 0.9(x-x_1)/(x_2-x_1)+0.1 & x_1 < x < x_2 \\ 0.1 & x \leq x_1 \end{cases} \quad (1)$$

根据第二次土壤普查^[27]的养分分级标准表(表 3)及研究区土壤养分特征确定各指标转折点的值(表 4),使结果具有可比性。

1.3.3 肥力评价指数的计算 利用模糊数学中的加乘法将各肥力指标的权重值和隶属度值代入公式(2)计算土壤综合肥力指数：

$$IFI = \sum_{i=1}^n W_i \times F_i \quad (2)$$

式中： n 为因子数， W_i 和 N_i 分别表示第 i 个指标的权重和隶属度。IFI 取值范围为 0 ~ 1，该值越接近 1，表示土壤肥力越高。

1.3.4 土壤综合肥力分级 根据前人研究和金沙江干热河谷土壤肥力特征，并结合等距法^[28]，将研究区土壤肥力划分为 5 个等级(表 5)。

1.3.5 空间变异性分析 地统计学方法已被广泛地应用于土壤肥力指标的空间变异性研究中^[29]。半方差函数是地统计学的基础研究工具，本研究采用该函数定量描述各肥力指标及 IFI 值的空间变异性。公式如下：

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

式中： $\gamma(h)$ 为滞后距离为 h 时的半方差函数； $N(h)$ 是相距为 h 时的样本点对数； $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 分别是变量在空间位置 x_i 和 $x_i + h$ 处的观测值。理论上当两采

样点距离为 0 时，半方差函数值应为 0，但由于误差和空间变异等因素的存在，使得在实际应用中当 $h=0$ 时存在块金值(C_0)；当半方差函数 $\gamma(h)$ 随 h 增加到一个基本稳定的常数，这个常数被称为基台值($C_0 + C$)^[30]。指数模型、高斯模型、线性模型和球状模型都是常用的半方差函数理论模型^[31]。

表 2 土壤肥力指标的平均相关系数及权重
Table 2 Average correlation coefficients and weights of soil fertility indicators

土层(cm)	指标	相关系数均值	权重
0 ~ 10	碱解氮	0.310	0.281
	有机质	0.381	0.347
	CEC	0.088	0.080
	速效钾	0.176	0.160
	速效磷	0.108	0.098
10 ~ 20	Chao1	0.037	0.034
	碱解氮	0.377	0.286
	有机质	0.437	0.331
	CEC	0.155	0.118
	速效钾	0.123	0.093
	速效磷	0.180	0.137
	Chao1	0.046	0.035

表 3 第二次土壤普查的养分分级标准^[27]
Table 3 Nutrient grading criteria for 2nd national soil survey

等级	碱解氮(mg/kg)	有机质(g/kg)	CEC(cmol/kg)	速效钾(mg/kg)	速效磷(mg/kg)
1	>150	>40	>20	>200	>40
2	120 ~ 150	30 ~ 40	15.4 ~ 20	150 ~ 200	20 ~ 40
3	90 ~ 120	20 ~ 30	10.5 ~ 15.4	100 ~ 150	10 ~ 20
4	60 ~ 90	10 ~ 20	6.2 ~ 10.5	50 ~ 100	5 ~ 10
5	30 ~ 60	6 ~ 10	<6.2	30 ~ 50	3 ~ 5
6	<30	<6		30	<3

表 4 隶属度函数曲线中评价指标的转折点
Table 4 Turning points of soil fertility indexes in membership function curves

转折点	碱解氮(mg/kg)	有机质(g/kg)	CEC(cmol/kg)	速效钾(mg/kg)	速效磷(mg/kg)	Chao1
下限值(x_1)	7	8	7.8	80	0.1	0.97
上限值(x_2)	15.5	16	8.3	114	0.7	0.976

表 5 土壤综合肥力指数分级
Table 5 Classification of soil integrated fertility index

土壤肥力等级	I	II	III	IV	V
IFI	>0.8	0.8 ~ 0.7	0.7 ~ 0.6	0.6 ~ 0.4	0.4

1.4 数据处理

为避免样本受各方面影响出现离群值，本研究采用拉依达法^[32]检测离群值，将其剔除后分别用数据正常值的最大值、最小值进行替换处理，以提高数据的准确度。并运用 SPSS 26.0 软件对数据进行描述性

统计，正态分布检验(Kolmogorov-Smirnov，简称 K-S)；运用软件 GS+9.0 进行半方差函数模拟，结合 ArcGIS10.8 软件地统计模块对采样点各土壤肥力指标进行克里格(Kriging)插值，生成土壤肥力指标的空间分布图。

2 结果与讨论

2.1 各项肥力指标的描述性统计

表 6 展示了研究区表层(0 ~ 10 cm)和深层(10 ~

20 cm)土壤各项肥力指标的描述性统计结果。由表 6 可知, CEC 和 Chao1 指数的变异系数均小于 0.1, 属于弱变异。有机质和速效钾的变异系数处于 0.1~0.72, 属于中等变异强度, 表明不同程度上受人为扰动影响。碱解氮和速效磷的变异系数均大于 0.72, 表现为强变异。其中表层和深层速效磷的变异系数最大分别为 1.37 和 0.99, 一方面说明其受人为因素影响较大, 可能是由于施肥不均或裸露土壤的水土流失所致; 另一方面, 这也与磷在土壤中的自身特性有关, 因为土壤对磷素的强吸附能力会导致其在土壤中迁移缓慢。单艳红等^[33]研究发现土壤磷素在剖面的迁移能力弱, 但易随地表径流流失。从偏度和峰度来看,

除 CEC 外, 其他肥力指标的偏度均为正值, 呈现右偏分布。

此外, 参考第二次土壤普查的养分分级标准(表 3), 研究区碱解氮和速效磷平均含量极低, 小于 6 级水平, 有机质和 CEC 属于 4 级水平, 速效钾属于 3 级水平。各项肥力指标采用 K-S 非参数检验, 结果显示表层和深层土壤速效钾数据和 Chao1 指数符合正态分布, 表层和深层土壤碱解氮、有机质和速效磷数据经对数转换后均符合正态分布, 因此可以进行半变异分析。然而, 表层和深层土壤 CEC 数据经过对数转换或归一化处理仍不符合正态分布, 且偏度进一步增大, 因此需要保留原始数据进行分析^[34]。

表 6 土壤肥力指标描述性统计
Table 6 Descriptive statistics of soil fertility indexes

土层(cm)	肥力指标	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数	偏度	峰度	K-S 检验
0~10	碱解氮(mg/kg)	4.80	56.94	14.08	11.60	0.82	2.579	6.55	对数正态
	有机质(g/kg)	4.76	42.92	14.02	8.62	0.61	1.98	4.06	对数正态
	CEC(cmol/kg)	7.09	8.50	8.04	0.35	0.04	-1.23	0.84	非正态
	速效钾(mg/kg)	34.96	170.42	98.53	25.36	0.26	0.18	0.95	正态
	速效磷(mg/kg)	0.07	3.84	0.65	0.89	1.37	2.58	6.15	对数正态
	Chao1	0.96	0.99	0.97	0.01	0.01	1.43	3.90	正态
10~20	碱解氮(mg/kg)	4.78	48.24	12.14	8.76	0.72	2.64	7.52	对数正态
	有机质(g/kg)	4.65	42.92	12.70	8.23	0.65	2.34	5.97	对数正态
	CEC(cmol/kg)	7.17	8.35	8.02	0.29	0.04	-1.35	1.33	非正态
	速效钾(mg/kg)	52.96	181.09	109.78	30.34	0.28	0.37	-0.38	正态
	速效磷(mg/kg)	0.08	3.83	0.74	0.73	0.99	2.22	6.39	对数正态
	Chao1	0.90	0.95	0.93	0.01	0.01	0.32	-0.75	正态

2.2 各项肥力指标的空间结构

2.2.1 肥力指标的半方差函数

本研究通过决定系数和残差平方和来确定最适半方差函数模型(表 7)。其中, 速效磷符合球状模型, 速效钾和表层 CEC 符合线形模型, 深层 Chao1 符合指数模型, 其他指标则最适合高斯模型。块金系数($C_0/(C+C_0)$)为块金值与基台值的比值, 其表示随机因素引起的空间变异占总变异的比^[35]。研究区碱解氮、有机质、CEC 及深层速效磷的块金系数均小于 25%, 在空间上呈现强空间自相关性, 表明其变异主要受结构性因素(气候、地形和母质等)的影响。深层速效钾块金系数大于 75%, 在空间上呈现弱空间自相关性, 说明随机性因素在其空间变异中占主导地位。变程反映了变量空间

自相关性的最大距离^[36]。研究区有机质、速效钾、Chao1 指数及表层 CEC 变程较大, 均大于 1 000 m, 深层有机质变程达 4 226 m, 为区内最大, 表明环境因素在较大范围内影响其空间变异性。碱解氮、速效磷和深层 CEC 变程较小, 在 104~248 m 范围内, 结合块金系数可以看出, 其在小范围内具有最显著的空间变异性, 空间分布特征也最为复杂。由于各土壤肥力指标的变程均大于取样间距, 进一步研究时可以适当地增大采样面积而减少采样点数^[37]。

2.2.2 肥力指标的空间插值

为了更直观地展现各项肥力指标的空间特征, 本研究采用普通克里格插值法生成了不同采样深度下的各肥力指标空间分布趋势图(图 2)。从图 2 中可以看出, 表层与深层各土

表 7 肥力指标的半方差函数模型及参数
Table 7 Semi-variance function model and parameters of soil fertility indexes

土层(cm)	肥力指标	理论模型	块金值	基台值	块金系数(%)	变程(m)	残差平方和	决定系数
0~10	碱解氮	高斯模型	0.000 1	0.262 2	0.4	145	0.011 7	0.742
	有机质	高斯模型	0.128	0.675	19.0	2 927	0.016 6	0.815
	CEC	线性模型	0.000 2	0.083 2	0.2	1 397	0.109	0.142
	速效钾	线性模型	357	774	46.0	1 026	108 685	0.633
	速效磷	球状模型	0.06	0.186	32.3	248	6.642×10 ⁻³	0.478
	Chao1	高斯模型	0.000 21	0.000 91	23.1	3 613	5.167×10 ⁻¹⁰	0.681
10~20	碱解氮	高斯模型	0.000 1	0.213	0.1	152	9.572×10 ⁻³	0.702
	有机质	高斯模型	0.122	1.219	10.0	4 226	0.014 3	0.858
	CEC	高斯模型	0.000 1	0.090 2	0.1	130	7.884×10 ⁻³	0.294
	速效钾	线性模型	872.09	1 091.83	79.9	1 030	158 735	0.246
	速效磷	球状模型	0.016 1	0.159 2	10.1	104	9.194×10 ⁻³	0.217
	Chao1	指数模型	0.000 1	0.000 2	50.1	1 005	8.090×10 ⁻⁹	0.474

壤肥力指标分布特征大体一致,表层碱解氮和有机质平均含量略高于深层,而表层速效钾含量则整体略低于深层。碱解氮和有机质的分布趋势相似,均表现为由西北向东南逐渐降低的趋势。碱解氮分布比较均匀,含量集中在 8.00 ~ 28.00 mg/kg,含量最高区域呈零星斑状散落在研究区西北侧。有机质分布由西北向东南呈带状并逐渐降低,含量在 7.00 ~ 12.50 g/kg 的区域占比最多。CEC 分布较为均匀,东南侧含量偏低。速效钾分布比较复杂,规律性不强,表明其受人为因素影响较大。速效磷含量大体集中在 0.08 ~ 1.40 mg/kg,处于极低水平,高值斑点小而少,可能受当地气候、土壤质地及研究区土壤裸露影响,速效磷在研究区小尺度下流失严重,这与块金系数一致。彭辉等^[38]在对云南干热河谷地区进行土壤养分评价时得出了相似的结论。极低的土壤速效磷含量会严重限制植物根系生长,因此如何增加土壤速效磷含量是研究区改良土壤肥力的重中之重。Izhar Shafi 等^[39]通过适量施用磷肥改善了土壤理化性质,从而促进了植物生长。Chao1 指数表层与深层分布一致,高值均分布在东北侧,这与速效磷含量分布相似,说明土壤微生物受磷含量影响。冯慧芳^[40]等研究表明,对低磷土壤施用适量磷肥能显著提高土壤微生物活性,有利于土壤肥力的恢复和提高。

2.3 土壤综合肥力指数(IFI)特征

2.3.1 IFI 描述性统计 对研究区 50 个样点的 IFI 值分两层进行描述性统计分析(表 8),结果表明,样点的 IFI 值服从正态分布,变异系数为 38%,属于中

等强度变异。其中,表层土壤的 IFI 平均值为 0.55,偏度为负值,其分布峰为左偏;深层土壤的 IFI 平均值为 0.53,偏度为正,其分布峰为右偏。偏度代表着指标在分布上的不对称性,表明表层土壤的大多数 IFI 值大于其平均值,而深层土壤的大多数 IFI 值小于其平均值。

2.3.2 IFI 空间特征 运用 GS+9.0 软件对研究区表层和深层土壤 IFI 值进行半变异函数拟合(表 9),结果表明,表层土壤 IFI 值用球状模型拟合效果最好,决定系数达 0.729;深层土壤 IFI 值用高斯模型拟合效果最好,决定系数为 0.684。根据块金系数可知,研究区土壤综合肥力的空间分布受到随机性因素和结构性因素的共同影响。

采用 ArcGIS10.8 软件的克里格插值工具绘制研究区土壤综合肥力指数的空间分布图^[41]。克里格插值通过样点 IFI 值能够对估计点 IFI 值做出最优估计,以点带面预测研究区土壤综合肥力指数的分布。王志刚等^[42]通过对有限点调查采样,可靠地预测了长三角典型地区土壤综合肥力的空间分布。由图 3 可以看出,IFI 值在空间分布上同碱解氮、有机质分布特征相似,而与速效钾、Chao1 空间分布特征存在一定差异,这与指标权重一致。从肥力等级分布来看,0~10 cm 土层中,I、II 类主要分布在西北侧,小面积位于西南角呈圆斑状,III 类分布最广,IV、V 类分布于中部和东南侧。10~20 cm 土层中,I、II 类分布于西北侧,III 类西南侧,末端呈带状延申至东北角,IV、V 类占研究区面积最大,分布于南侧至中部。表层与

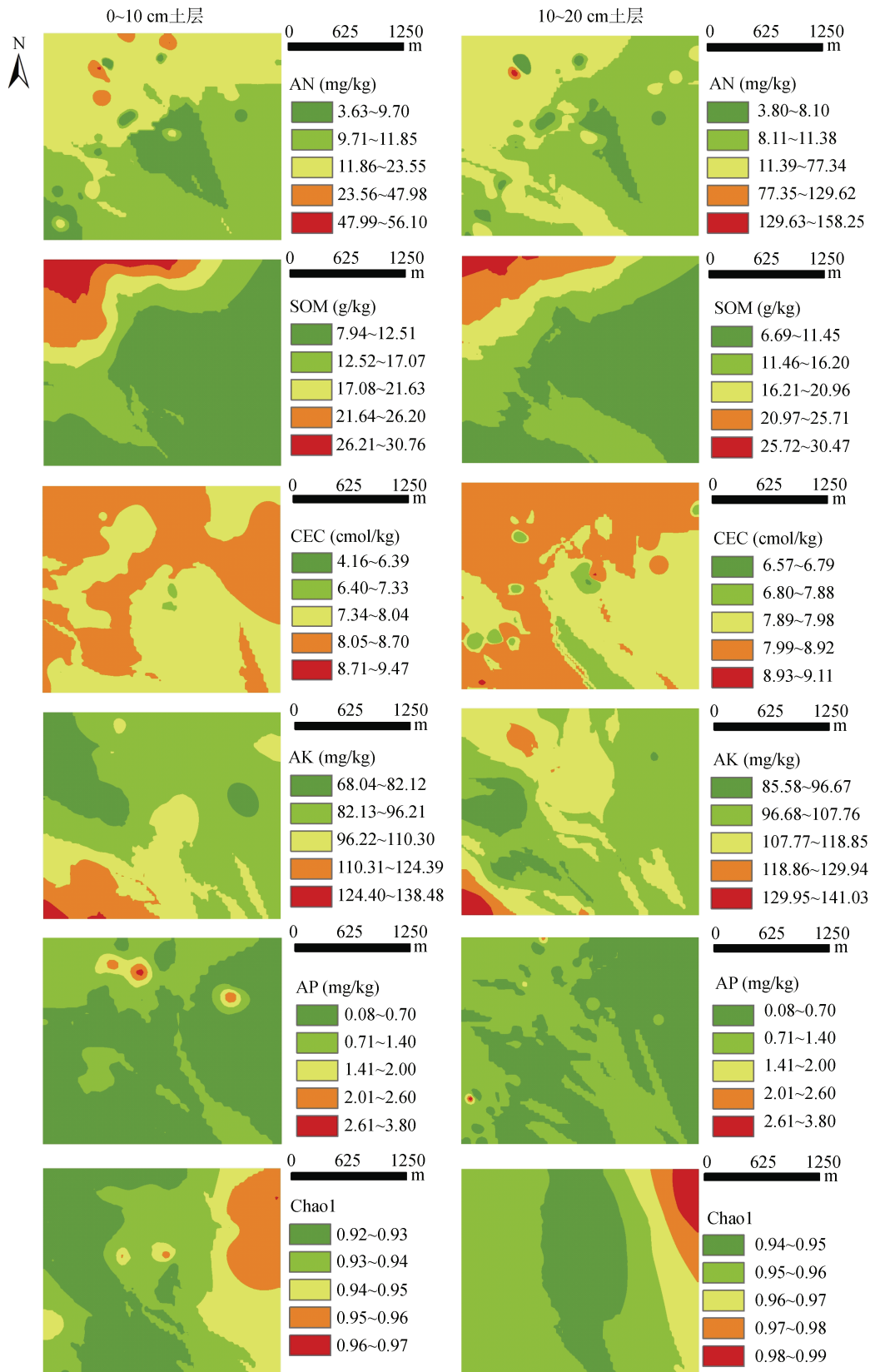


图 2 研究区肥力指标空间分布
Fig. 2 Spatial distributions of soil fertility indexes

表 8 土壤综合肥力指数描述性统计
Table 8 Descriptive statistics of soil integrated fertility index

土层(cm)	项目	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数	偏度	峰度	K-S 检验
0~10	IFI	0.14	0.98	0.55	0.22	0.38	-0.82	-0.99	正态
10~20	IFI	0.20	0.97	0.53	0.20	0.38	0.56	-0.52	正态

表 9 土壤综合肥力指标的半方差函数模型及参数
Table 9 Semi-variance function models and parameters of soil integrated fertility index

土层(cm)	项目	理论模型	块金值	基台值	块金系数(%)	变程(m)	残差平方和	决定系数
0~10	IFI	球状模型	0.019	0.062	0.31	1 003	6.433×10^{-4}	0.729
10~20	IFI	高斯模型	0.023	0.056	0.41	1 300	4.230×10^{-4}	0.684

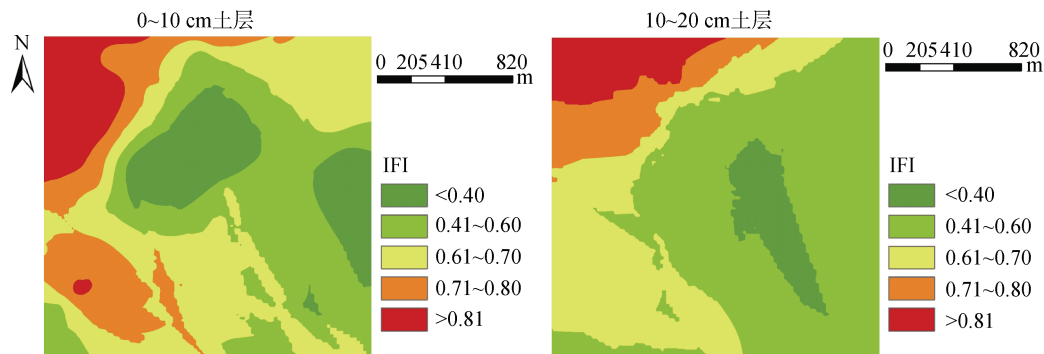


图 3 研究区土壤综合肥力指数空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of soil integrated fertility indexes in study area

深层土壤综合肥力等级相比,表层Ⅲ、Ⅴ类占比略多,深层则Ⅳ类占比更多,其他类别分布相似,从而整体肥力等级相当,这可能是由于研究区植被覆盖率低,每年枯枝落叶归还土壤量少。张俊华等^[43]研究表明土壤表层养分聚集与每年枯枝落叶归还土壤有关。研究区西北侧土壤肥力等级高于其他区域,一方面西北侧多为低矮丘陵,植被覆盖率相对较高,而东南区域有大量弃渣;另一方面,西北侧建筑为居民宿舍,该区域土壤在 2017 年白鹤滩一期绿化工程中得到改良^[44],且经实地考察,该区绿化景观建设良好,植物物种多样性高,而南部及东部不在该绿化工程规划中,且建筑为工程设施,对环境影响更大。大型工程设施在建设过程中不可避免地会对区域生态环境造成影响,合理预测及调控才能促使工程建设与生态环境相协调。

3 结论

1) 研究区碱解氮和速效磷平均含量极低,小于土壤养分分级标准的 6 级水平,有机质和 CEC 属于 4 级水平,速效钾属于 3 级水平。CEC 和 Chao1 的变异系数小于 0.1,表现为弱变异;有机质和速效钾的变异系数处于 0.1 ~ 0.72,属于中等变异强度;碱解氮和速效磷的变异系数均大于 0.72,表现为强变异。

2) 指标权重能够反映各土壤肥力指标对 IFI 影响程度,研究区碱解氮和有机质权重最大,Chao1 权重最小。深层速效钾块金系数大于 75%,在空间上呈现弱空间自相关性;碱解氮、有机质、CEC、表层 Chao1 和深层速效磷块金系数均小于 25%,在空间上呈现强空间自相关性。

3) 研究区表层与深层土壤综合肥力指数的空间分布特征相似,呈现出明显的西北高东南低,其中Ⅳ、Ⅴ类分布最广。研究区土壤肥力水平普遍偏低,应根据各土壤养分情况合理调整氮、磷、钾肥的施用配比。而土壤速效钾含量水平稍高于碱解氮及速效磷含量水平,应适当降低钾肥比例。研究区东部及南部弃渣场土壤氮、磷养分匮乏程度尤为严重,应进一步增加氮、磷肥施用量,更为精准地改良研究区土壤肥力状况。

参考文献:

- [1] 朱静霞. 赋能金沙江 解码乌东德水电站的综合效益[J]. 中国三峡, 2020(7): 90-95.
- [2] 方睿红, 常庆瑞, 宋利珍. 改进属性识别模型在秦巴山区土壤肥力评价中的应用[J]. 土壤通报, 2012, 43(5): 1151-1155.
- [3] 杨树明, 余小芬, 邹炳礼, 等. 曲靖植烟土壤 pH 和主要养分空间变异特征及其影响因素[J]. 土壤, 2021, 53(6): 1299-1308.

- [4] 文春玉, 徐明, 聂坤, 等. 亚热带山地马尾松-甜槠针阔混交林土壤养分空间分布特征与合理取样[J]. 土壤, 2023, 55(6): 1244-1250.
- [5] Liu S L, An N N, Yang J J, et al. Prediction of soil organic matter variability associated with different land use types in mountainous landscape in southwestern Yunnan Province, China[J]. CATENA, 2015, 133: 137-144.
- [6] 王幼奇, 白一茹, 展秀丽. 在不同尺度下宁夏引黄灌区农田土壤养分空间变异分析[J]. 干旱区研究, 2014, 31(2): 209-215.
- [7] 薛莲, 李占斌, 李鹏, 等. 不同土地利用方式对干热河谷地区土壤酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(18): 3768-3777.
- [8] 刘伟. 基于干热河谷山地环境条件下的观光农业园总体规划研究[J]. 林业调查规划, 2018, 43(6): 202-210.
- [9] Parjono, Permadi M G, Witdarko Y, et al. The evaluation of soil chemistry fertility in dryland, agroforestry, and forest[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1125(1): 012088.
- [10] 林艺真, 邱炳文, 陈芳鑫, 等. 干旱胁迫下植物抗逆性大尺度遥感监测方法[J]. 地球信息科学学报, 2022, 24(11): 2225-2233.
- [11] 孟博, 周一帆, 杨林生, 等. 勐海县甘蔗土壤养分空间分布特征及肥力评价[J]. 土壤, 2022, 54(2): 277-284.
- [12] 马芊红, 张光辉, 耿韧, 等. 我国水蚀区坡耕地土壤肥力现状分析[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 190-196, 204.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [14] 阚丽艳. 有机覆盖物对园林马尼拉草土壤水分、养分、微生物的影响及肥力综合评价[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2016, 34(4): 76-83.
- [15] 尹国丽, 李亚娟, 张振粉, 等. 不同草田轮作模式土壤养分及细菌群落组成特征[J]. 生态学报, 2020, 40(5): 1542-1550.
- [16] 王鹏, 陈波, 张华. 基于高通量测序的鄱阳湖典型湿地土壤细菌群落特征分析[J]. 生态学报, 2017, 37(5): 1650-1658.
- [17] 范茂攀, 周锋, 吴开贤, 等. 滇中东部典型岩溶区农田土壤肥力评价[J]. 土壤, 2019, 51(6): 1093-1099.
- [18] 白根川, 王昌全, 夏建国, 等. 基于 GIS 技术的平昌县域耕地地力评价[J]. 中国农学通报, 2012, 28(29): 212-220.
- [19] 杨奇勇, 杨劲松, 姚荣江, 等. 基于 GIS 和改进灰色关联模型的土壤肥力评价[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 100-105.
- [20] 包耀贤, 徐明岗, 吕粉桃, 等. 长期施肥下土壤肥力变化的评价方法[J]. 中国农业科学, 2012, 45(20): 4197-4204.
- [21] Li Z W, Huang J Q, Li Y Y, et al. Assessment on soil fertility of Dongting Lake wetland area (China) based on GIS and fuzzy evaluation[J]. Journal of Central South University, 2011, 18(5): 1465-1472.
- [22] 郭迎新, 陈永亮, 苗琪, 等. 洱海流域植烟土壤养分时空变异特征及肥力评价[J]. 中国农业科学, 2022, 55(10): 1987-1999.
- [23] 陈正发, 史东梅, 何伟, 等. 基于“要素-需求-调控”的云南坡耕地质量评价[J]. 农业工程学报, 2020, 36(12): 236-246.
- [24] 董佳琦, 张勇, 傅伟军, 等. 香榧主产区林地土壤养分空间异质性及其肥力评价[J]. 生态学报, 2021, 41(6): 2292-2304.
- [25] 梁斌, 齐实. 北京山区土壤养分空间变化特征研究[J]. 土壤, 2018, 50(4): 769-777.
- [26] 李建查, 何光熊, 张武, 等. 云南干热河谷葡萄园土壤肥力特征与初步评价[J]. 热带农业科学, 2016, 36(11): 1-6, 12.
- [27] 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.
- [28] 岳学文, 潘志贤, 史亮涛, 等. 金沙江干热河谷典型灌木群落的土壤养分特征[J]. 西南农业学报, 2016, 29(11): 2665-2668.
- [29] 崔潇潇, 高原, 吕貽忠. 北京市大兴区土壤肥力的空间变异[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 327-333.
- [30] 王婕, 牛文全, 张文倩, 等. 农田表层土壤养分空间变异特性研究[J]. 农业工程学报, 2020, 36(15): 37-46.
- [31] 马渝欣, 李徐生, 李德成, 等. 江淮丘陵区农田表层土壤有机碳空间变异——以定远县为例[J]. 土壤, 2014, 46(4): 638-643.
- [32] 朱嘉欣, 包雨恬, 黎朝. 数据离群值的检验及处理方法讨论[J]. 大学化学, 2018, 33(8): 58-65.
- [33] 单艳红, 杨林章, 沈明星, 等. 长期不同施肥处理水稻土磷素在剖面的分布与移动[J]. 土壤学报, 2005, 42(6): 970-976.
- [34] 任煜堃. 山西省森林土壤因子空间变异特征[J]. 中国农学通报, 2021, 37(32): 42-50.
- [35] 赵义博, 雷少刚, 刘英. 胜利矿区土壤养分空间变异特征与影响因素[J]. 土壤, 2020, 52(2): 356-364.
- [36] 张志华, 张锦豪, 桑玉强, 等. 太行山南麓坡面土壤碳氮空间变异性及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2021, 32(8): 2829-2838.
- [37] 王幼奇, 白一茹, 赵云鹏. 宁夏砂田小尺度土壤性质空间变异特征与肥力评价[J]. 中国农业科学, 2016, 49(23): 4566-4575.
- [38] 彭辉, 杨艳鲜, 潘志贤, 等. 云南金沙江干热河谷土壤肥力综合评价[J]. 热带作物学报, 2011, 32(10): 1820-1823.
- [39] Izhar Shafi M, Adnan M, Fahad S, et al. Application of single superphosphate with humic acid improves the growth, yield and phosphorus uptake of wheat (*Triticum aestivum* L.) in calcareous soil[J]. Agronomy, 2020, 10(9): 1224.
- [40] 冯慧芳, 林婉奇, 薛立. 氮磷添加和栽植密度对大叶相思林土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(6): 2305-2314.
- [41] 王德彩, 叶希琛, 张雅梅, 等. 利用数字土壤制图技术评价桉树林土壤肥力[J]. 土壤通报, 2021, 52(1): 139-147.
- [42] 王志刚, 赵永存, 黄标, 等. 采样点数量对长三角典型地区土壤肥力指标空间变异解析的影响[J]. 土壤, 2010, 42(3): 421-428.
- [43] 张俊华, 常庆瑞, 贾科利, 等. 黄土高原植被恢复对土壤肥力质量的影响研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(4): 38-41.
- [44] 蒿海磊, 徐思伟. 城市滨水环城生态带规划探析——以成都市新津环城生态带(东部)建设项目为例[J]. 规划师, 2019, 35(10): 73-80.