

DOI: 10.20103/j.stxb.202408312093

廖丹琦, 张连凯, 杨万涛, 张亚, 李强, 刘朋雨, 王杰, 宋琳, 兰明国. 金沙江下游乌东德和白鹤滩库区土壤养分空间分异特征. 生态学报, 2025, 45 (11): 5124-5136.

Liao D Q, Zhang L K, Yang W T, Zhang Y, Li Q, Liu P Y, Wang J, Song L, Lan M G. Soil nutrient heterogeneity at Wudongde and Baihetan reservoirs in the Jinsha river's lower reaches. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45 (11): 5124-5136.

金沙江下游乌东德和白鹤滩库区土壤养分空间分异特征

廖丹琦^{1,2}, 张连凯^{1,2}, 杨万涛^{1,2,3,4,*}, 张亚^{1,2}, 李强^{1,2}, 刘朋雨⁵, 王杰^{1,2}, 宋琳^{1,2}, 兰明国^{1,2,6}

1 中国地质调查局昆明自然资源综合调查中心, 金沙江高山峡谷区水土资源演化与固碳增汇效应云南省野外科学观测研究站, 昆明 650100

2 自然资源部自然生态系统碳汇工程技术创新中心, 西南山地生态地质演化与保护修复创新基地, 昆明 650100

3 自然资源部自然资源要素耦合过程与效应重点实验室, 北京 100055

4 云南大学国际河流与生态安全研究院, 云南省水土流失防治与绿色发展重点实验室, 昆明 650500

5 中国地质科学院岩溶地质研究所, 自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室, 联合国教科文组织国际岩溶研究中心, 桂林 541004

6 中国地质调查局元素形态与新污染物检验检测技术创新中心, 昆明 650100

摘要:干热河谷库区土壤养分的维持对水土保持和生态修复具有关键作用,但在库区不同位置的土壤养分特征尚不明确。研究以金沙江下游的乌东德和白鹤滩库区为案例,于库首、库中和库尾,按表层(0—10 cm)和次表层(10—20 cm)分层采集表层土壤样品,测定土壤养分含量。基于第二次土壤养分分级标准,集成模糊综合评价、随机森林模型和自然断点分析方法,构建土壤养分空间分异特征分析模型,厘清土壤养分空间分异特征,并提出分区管理策略。结果表明:(1)研究区土壤呈弱碱性,土壤有机质、全钾、速效钾、有效锰和有效铜含量较高,处于1级,有效锌含量为2级,阳离子交换量、有效硼和有效钼含量较低,处于4级,全磷处于5级;(2)0—10 cm 土层土壤养分整体较高,处在0.53—0.66范围内,高值出现在乌东德和白鹤滩的库尾区,10—20 cm 土层土壤养分整体处于0.43—0.58之间,其中土壤养分指数高值则出现在水电站的库中区。(3)表层土壤主要受人为活动和植被影响,次表层则更多受地形和土壤属性影响,库首大部分区域处在土壤养分保持区,库中总体为养分恢复区,库尾则是风险防控区,对于库尾应更多考虑增加植被种植,控制社会经济发展和人口增长带来的负面影响。研究通过系统构建可比的综合指标,能够分析梯级水电库区表层土壤养分的空间异质性,以实现上下游库区的综合管理,指示干热河谷地区的生态修复策略。

关键词:干热河谷;土壤养分;梯级水电;金沙江;空间异质性

Soil nutrient heterogeneity at Wudongde and Baihetan reservoirs in the Jinsha river's lower reaches

LIAO Danqi^{1,2}, ZHANG Liankai^{1,2}, YANG Wantao^{1,2,3,4,*}, ZHANG Ya^{1,2}, LI Qiang^{1,2}, LIU Pengyu⁵, WANG Jie^{1,2}, SONG Lin^{1,2}, LAN Mingguo^{1,2,6}

1 Yunnan Provincial Observation and Research Station for Soil and Water Resources and Carbon Sequestration in the Alpine Gorge Area of Jinsha River, Kunming General Survey of Natural Resources Center, China Geological Survey, Kunming 650100, China

2 Innovation Base for Eco-geological Evolution, Protection and Restoration of Southwest Mountainous Areas, Technology Innovation Center for Natural Ecosystem Carbon Sink, Ministry of Natural Resources, Kunming 650100, China

基金项目:国家自然科学基金项目(U2102209);自然资源部自然资源要素耦合过程与效应重点实验室开放课题(2024KFKT002);自然资源综合调查指挥中心科技创新课题(KC20230019);地质调查项目(DD20220888)

收稿日期:2024-08-31; **采用日期:**2025-05-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ywantao@126.com

3 Key Laboratory of Coupling Process and Effect of Natural Resources Elements, Ministry of Natural Resources, Beijing 100055, China

4 Yunnan Key Laboratory of Soil Erosion Prevention and Green Development, Institute of International Rivers and Eco-Security, Yunnan University, Kunming 650500, China

5 Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR/International Research Center on Karst under the Auspices of UNESCO, Guilin 541004, China

6 Technology Innovation Center for Analysis and Detection of the Elemental Speciation and Emerging Contaminants, China Geological Survey, Kunming 650100, China

Abstract: For the purpose of conserving soil and water as well as restore ecosystems, maintaining soil nutrient levels in dry-hot valley reservoir regions is essential. However, the spatial characteristics of soil nutrients within reservoir areas remain poorly understood. This study focused on the Wudongde and Baihetan reservoir areas located in the lower reaches of the Jinsha River. Surface soil samples were collected from the head, middle, and tail of the reservoir, including both surface layer (0—10 cm) and subsurface layer (10—20 cm), and the soil nutrient content were measured. Based on the second soil nutrient grading standard, a soil nutrient spatial differentiation analysis model was developed by integrating fuzzy comprehensive evaluation, the random forest model, and natural breakpoint analysis. This model aimed to elucidate the spatial differentiation characteristics of soil nutrients and propose zoning management strategies. The findings indicate that: (1) the soil in the study area was weakly alkaline, with high contents of soil organic matter, total potassium, available potassium, available manganese, and available copper, all of which were at level 1. Available zinc content was at level 2, while cation exchange capacity, available boron, and available molybdenum contents were low, at level 4, and total phosphorus was at level 5; (2) the nutrient in the 0—10 cm soil layer is generally high, ranging from 0.53 to 0.66; the highest values were found in the reservoir tail areas of Wudongde and Baihetan; for the 10—20 cm soil layer, the nutrient content generally ranges between 0.43 and 0.58, with the highest values located in the middle sections of the reservoirs; (3) Surface soil nutrient variation was mainly influenced by human activities and vegetation, whereas the subsurface soil was more affected by topography and soil properties. Most areas of the reservoir head were in the soil nutrient conservation zone, the reservoir middle was generally in the nutrient recovery zone, and the reservoir tail was in the risk prevention and control zone.

Key Words: dry-hot valley; soil nutrients; cascade power station; Jinsha River; spatial heterogeneity

水电站开发背景下,干热河谷地区的土壤养分流失日益严峻^[1-2]。梯级水电站库区上下游库区间的补偿和累积效应^[3],进一步增加了土壤养分时空分布的复杂性^[4-5]。掌握梯级水电站库区不同分区的土壤养分空间分布特征,识别影响土壤养分的主要环境变量,对于实现干热河谷地区梯级水电站的生态开发具有重要意义。以往关于库区土壤养分空间分布特征及其影响因素的研究,主要选取土壤有机质、氮、磷等指标^[6-7],探讨采样点与水电站距离对单一指标的影响^[8],这会导致在土壤养分管理时顾此失彼,缺乏系统性认识。近年来考虑多重因素(如梯级水电站上下游库区之间的相互作用^[9],水流速度、泥沙沉积和坡度等^[10-11])影响下,土壤养分的综合变化特征^[12]研究得到越来越多关注。

在已有土壤综合指数的研究中,目前通常考虑土壤有机质、氮、磷等指标,并采用隶属函数和主成分分析(PCA)等方法对土壤养分进行综合评价^[13-14],然而,这些研究采用的衡量指标并未统一,缺乏可比性,且少有学者将微量元素纳入土壤养分的综合评价当中。微量元素的有效量可被植物直接吸收,能够反映植物营养元素的供给能力,是土壤养分评价的重要指标,且Cu和Zn既是养分元素,又是重金属元素,将微量元素其纳入考虑,能更直接地指导生态环境管理^[15]。因此,综合考虑有机质、氮、磷和微量元素等指标的土壤养分指数,能有效识别土壤养分流失的重点区域,在梯级水电开发过程中实现土壤养分的分区管理。

金沙江下游干热河谷地处横断山区,蕴含丰富的水能资源和独特的生态区位特点,是全国水电能源基地

和重要的生态宝库^[16],已经建成了大型梯级水电站。受特殊自然环境的影响,流域土壤养分与水土流失关系复杂,区域环境呈现出显著时空异质性特征,对土壤养分的分区管理和生态修复的思路尚不明确^[17]。Sun 等以金沙江干热河谷为研究对象,识别出速效氮、速效磷、土壤有机质和 pH 值等指标对水库蓄水具有敏感性^[18],为研究干热河谷库区土壤养分筛选出合适指标,但并未讨论流域内不同区段的分区管理策略。

本研究以乌东德和白鹤滩水电站库首、库中、库尾区域的表层土壤为对象,创新性地引入了涵盖物理性质(如含水率、容重)、基本化学性质(如 pH 值、阳离子交换量)、土壤有机质、常量元素养分(如全氮、全磷、全钾)和微量元素养分(如有效铁、有效锰、有效铜、有效锌)等 19 项指标,系统构建了土壤养分指数,填补了现有研究在微量元素和土壤养分综合评估方法方面的空白,为库区土壤养分的分区管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于金沙江下游乌东德-白鹤滩梯级水电站所在流域(以下简称“WDD-BHT 流域”),位于云南和四川两省交界处。区域内涵盖中国第一级阶梯与第二级阶梯,具有较大的地势起伏^[19],为水电能源开发奠定了坚实基础。两个水电站均为世界级巨型水电站,所在区域属于亚热带季风性气候。其年平均气温为 18—23 ℃,年平均降水量约为 732—1028 mm^[20],年蒸发量 2500—4000 mm,雨季通常从 5 月持续到 11 月,不同海拔下的水热条件具有显著差异,垂直地带性明显^[21]。干热河谷受西南季风和河谷地形引起的焚风影响,气候干热,植被以稀疏草原状植被为主,包括林地和干刺灌木。基岩又主要为灰岩、大理岩、砂页岩、泥灰岩、板岩、石英岩等^[22]。气候和地质等因素使得该区域植被恢复困难,水土流失严重,是典型的生态脆弱区^[4]。研究区主要土壤类型为燥红土、红壤、棕壤、紫色土和亚高山草甸土,受干热河谷气候影响,土壤具有明显的垂直地带分布规律^[23]。该区域主要植被为外来物种新银合欢树(*Leucaena leucocephala*),其广泛分布于干热河谷大部分区域,常用于退化土地的植被恢复和重建,所有新银合欢树群落具有相似的林分条件,类型均为灌丛。

1.2 实验方法

本研究以干热特征明显^[5]的乌东德(WDD),白鹤滩(BHT)库区(库首、库中、库尾)表层土壤为研究对象,探讨梯级水电库区土壤养分的分区管理,所以采用控制变量法,保证所有采样点的土地利用类型相同,都种植新银合欢树群。2023 年 4 月,在乌东德水电站的库首设置了 4 条样带(11 个点),库中设置 1 条样带(2 个点),库尾设置 2 条样带(7 个点),白鹤滩水电站库首 1 条样带(3 个点),库中 1 条样带(3 个点),库尾 1 条样带(2 个点)(图 1,表 1)。其中,WDD-1,WDD-3 和 BHT-4 样带,由于涉及高速公路修建等实际情况限制,仅采集 2 个样点的土壤样本。样地调协基于区域内的环境梯度,以全面反映库区不同位置的土壤养分特征。在每个样点设置 10 m×10 m 的样方,考虑植物对土壤养分的主要作用层为 0—20 cm^[24],在样方内按“S”形五点采样法采集(0—10 cm 和 10—20 cm)土壤样品 56 件,比较不同深度土层土壤养分的差异,反映表层土壤垂向的空间分异特征。

本研究在测定土壤理化性质的基础上,进一步分析养分特性。物理测试指标 2 项,土壤容重(Bulk density, BD)参考土壤检测第 4 部分:土壤容重的测定,利用 100 cm³环刀采集土样,并通过重量法进行测定,含水率(Soil Moisture Content, K)利用铝盒烘干方法进行测定。养分相关指标 17 项, pH 值测定参考区域地球化学样品分析方法(DZ/T 0279.27—2016)采用离子选择电极法,阳离子交换量(Cationic exchange capacity, CEC)参考森林土壤阳离子交换量的测定(LY/T 1243—1999)。重铬酸钾容量法、凯氏蒸馏-容量法、X 射线荧光光谱法和电感耦合等离子体原子发射光谱法测定土壤有机质(Soil organic matter, SOM)、全氮(Total Nitrogen, TN)、全磷(Total Phosphorus, TP)、全钾(Total Potassium, TK)。测定碱解氮(Hydrolyzable Nitrogen, HN)、速效磷(Available Phosphorus, AP)、速效钾(Available Potassium, AK)时,参考森林土壤氮的测定(LY/T 1228—2015)、森林土壤磷的测定(LY/T 1232—2015)和森林土壤钾的测定(LY/T 1234—2015)。测定交换性镁(Exchange magnesium, Mg)、交换性钙(Exchangeable calcium, Ca)时,参考地球化学调查样品分析方法:阳离

表 1 采样点信息
Table 1 Information of sampling sites

电站 Power station	位置 Position	样带编号 Code of sample band	样带长度/km Sample length	土壤类型 Soil type	采样点编号 Code of sampling point	经度 (E) Longitude	纬度 (N) Latitude	与电站距离/km Distance to power station	与支流距离/km Distance to tributaries	海拔/m Elevation
乌东德 Wudongde	库前	W-1	0.28	燥红土	WDD-1-1	102.59°	26.36°	3.87	2.00	1027
					WDD-1-2	102.59°	26.36°	3.84	2.04	1048
					WDD-1-3	102.59°	26.36°	3.73	2.11	1159
		W-2	2.33	燥红土	WDD-1-4	102.60°	26.39°	6.69	1.43	981
					WDD-1-5	102.59°	26.40°	7.78	2.27	1073
	库中	WDD-1	1.42	燥红土	WDD-1-8	102.59°	26.41°	8.99	3.23	1108
					WDD-1-6	102.58°	26.39°	6.94	1.10	1066
					WDD-1-9	102.58°	26.40°	8.33	2.51	1266
		WDD-2	2.30	燥红土、红壤	WDD-2-1	102.57°	26.33°	2.96	5.97	1653
					WDD-2-2	102.59°	26.33°	1.25	5.58	1405
白鹤滩 Baihetan	库中	WDD-3	0.43	燥红土	WDD-2-3	102.59°	26.34°	1.71	4.17	1092
					WDD-3-2	102.40°	26.30°	22.99	44.66	1311
					WDD-3-3	102.39°	26.31°	23.39	44.49	1495
		WDD-4	1.10	燥红土	WDD-4-1	101.96°	26.39°	72.38	49.67	1535
					WDD-4-2	101.95°	26.38°	72.63	49.25	1446
	库尾	WDD-5	3.00	燥红土、红壤	WDD-4-3	101.94°	26.38°	73.63	48.65	1205
					WDD-5-1	101.96°	25.98°	81.89	8.73	1071
					WDD-5-2	101.95°	25.98°	82.47	8.18	1275
		BHT-1	1.20	燥红土	WDD-5-3	101.95°	25.97°	83.28	7.40	1477
					WDD-5-4	101.94°	25.95°	85.33	5.83	1824
白鹤滩 Baihetan	库前	BHT-1	1.20	燥红土	BHT-1-1	102.87°	26.97°	23.61	1.38	949
					BHT-1-2	102.87°	26.98°	22.80	2.19	1249
					BHT-1-3	102.87°	26.98°	22.39	2.59	1373
	库中	BHT-3	1.41	燥红土	BHT-3-1	102.97°	26.86°	36.89	9.32	1052
					BHT-3-2	102.97°	26.86°	36.47	9.78	1032
					BHT-3-3	102.96°	26.87°	35.53	10.77	997
	库尾	BHT-4	0.93	燥红土	BHT-4-3	103.03°	26.52°	75.46	4.28	1348
					BHT-4-4	103.03°	26.51°	76.25	4.07	1093

子交换量和交换性钾钠钙镁的测定 (GKMNL-FB09-01.4—2023)。参考土壤检测 (NY/T 1121.9—2012) 测定有效钼 (Available Mo, Mo)。参考有效硼的测定-电感耦合等离子体发射光谱法 (GKMNL-FB09-01.3—2023) 测定有效硼 (Available B, B)。参考土壤 8 种有效态元素的测定方法,二乙烯三胺五乙酸浸提-电感耦合等离子体发射光谱法 (HJ 804—2016),测定有效铁 (Available Fe, Fe)、有效铜 (Available Cu, Cu)、有效锌 (Available Zn, Zn)、有效锰 (Available Mn, Mn)。

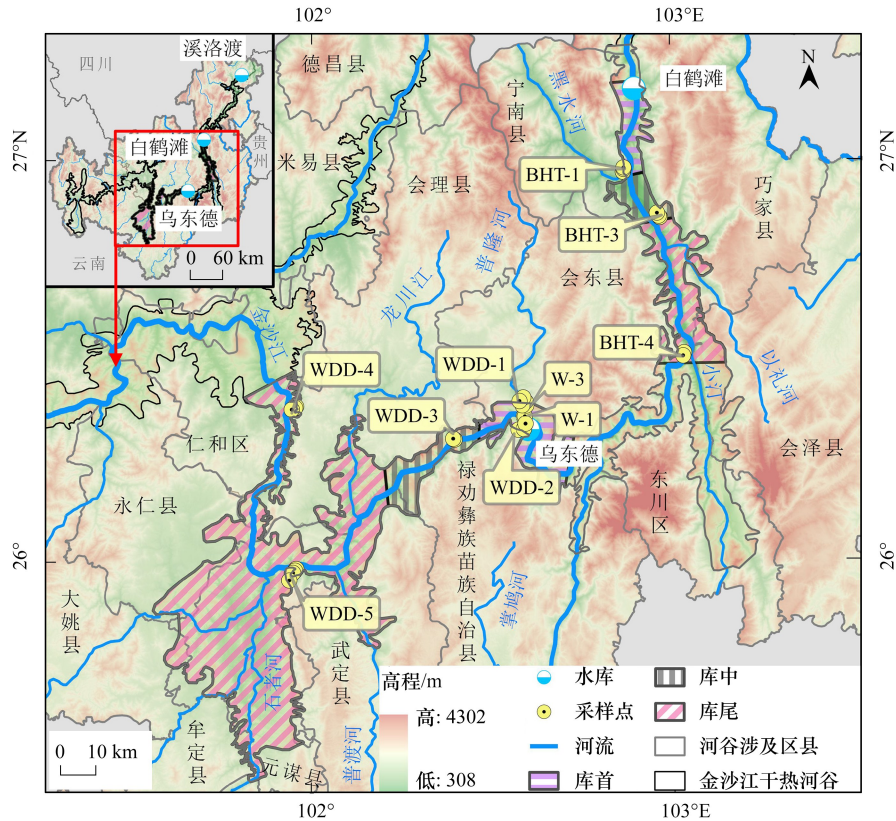


图 1 金沙江下游干热河谷及采样点位置

Fig.1 Dry hot valley and sampling sites in the lower reaches of Jinsha River

1.3 数据分析

1.3.1 土壤养分评价方法

单指标评价基于第二次全国土壤普查的分级评价标准^[25]进行评估(表 2,表 3)。

采用模糊综合评价法构建土壤养分综合指标,总结现有土壤养分综合评价指标^[11,21,26],首次将 17 项养分相关指标转化为 1 项范围处在 0.10—1.00 之间的综合指标。除了 pH 值外,其他 16 项指标与土壤养分质量都呈现正相关,即指标值越大,越能满足土壤养分需求,反之养分越缺乏,所以在评价时采用 S 型隶属度函数曲线来判断各样本值所属不同养分质量区间的概率,公式如下:

$$f(x_{i,j}) = \begin{cases} 1.0 & x_{i,j} \geq a_{2,j} \\ \frac{0.9(x_{i,j}-a_{1,j})}{a_{2,j}-a_{1,j}} & a_{1,j} < x_{i,j} < a_{2,j} \\ 0.1 & x_{i,j} \leq a_{1,j} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $x_{i,j}$ 为样本 i 的第 j 项指标; $a_{2,j}$ 为第 j 项指标的上限转折点,即超过该值则认为养分充足; $a_{1,j}$ 为第 j 项指标的下限转折点,即低于该值则认为养分缺乏。依据分级标准,将各指标 2 级区间上限值设置为上限转折点,将 4 级区间下限值设置为下限转折点^[27]。

表 2 土壤养分分类标准
Table 2 Soil nutrient classification criteria

指标 Indicator	分类 Classification
容重/(g/cm ³) Bulk density (BD)	坚实:>1.55;过紧实:(1.45, 1.55];紧实:(1.35, 1.45];偏紧:(1.25, 1.35];适宜:(1.00, 1.25];过松:<1.00
酸碱度 pH	碱性:>8.50;弱碱:(7.50, 8.50];中性:(6.50, 7.50];弱酸:(5.50, 6.50];酸性:(4.50, 5.50];强酸:<4.50
阳离子交换量/(cmol/kg) Cation exchange capacity (CEC)	强:>20.00;较强:(15.40, 20.00];中等:(10.50, 15.40];偏弱:(6.20, 10.50];弱:<6.20

表 3 土壤养分分级标准
Table 3 Soil nutrient grading criteria

指标 Indicator	级别 Level					
	1	2	3	4	5	6
土壤有机质 / % Soil organic matter (SOM)	>4.00	(3.00, 4.00]	(2.00, 3.00]	(1.00, 2.00]	(0.60, 1.00]	<0.60
全氮 / (mg/g) Total Nitrogen (TN)	>2.00	(1.50, 2.00]	(1.00, 1.50]	(0.75, 1.00]	(0.50, 0.75]	<0.50
全磷 / (mg/g) Total Phosphorus (TP)	>2.00	(1.50, 2.00]	(1.00, 1.50]	(0.75, 1.00]	(0.50, 0.75]	<0.50
全钾 / % Total Potassium (TK)	>2.00	(1.50, 2.00]	(1.00, 1.50]	(0.50, 1.00]	(0.30, 0.50]	<0.30
碱解氮 / (mg/kg) Hydrolyzable Nitrogen (HN)	>150.00	(120.00, 150.00]	(90.00, 120.00]	(60.00, 90.00]	(30.00, 60.00]	<30.00
速效磷 / (mg/kg) Available Phosphorus (AP)	>40.00	(20.00, 40.00]	(10.00, 20.00]	(5.00, 10.00]	(3.00, 5.00]	<3.00
速效钾 / (mg/kg) Available Potassium (AK)	>200.00	(150.00, 200.00]	(100.00, 150.00]	(50.00, 100.00]	(30.00, 50.00]	<30.00
交换性镁 / (cmol/kg) Exchangeable Magnesium (Mg)	>1.65	(0.81, 1.65]	(0.40, 0.81]	(0.20, 0.40]	<0.20	/
交换性钙 / (cmol/kg) Exchangeable Calcium (Ca)	>4.99	(3.48, 4.99]	(2.49, 3.48]	(1.50, 2.49]	<1.50	/
有效铁 / (mg/kg) Available Iron (Fe)	>20.00	(10.00, 20.00]	(4.50, 10.00]	(2.60, 4.50]	<2.60	/
有效锰 / (mg/kg) Available Manganese (Mn)	>30.00	(15.00, 30.00]	(5.00, 15.00]	(1.10, 5.00]	<1.10	/
有效铜 / (mg/kg) Available Copper (Cu)	>1.80	(1.00, 1.80]	(0.20, 1.00]	(0.11, 0.20]	<0.11	/
有效锌 / (mg/kg) Available Zinc (Zn)	>3.00	(1.00, 3.00]	(0.50, 1.00]	(0.30, 0.50]	≤0.30	/
有效硼 / (mg/kg) Available Boron (B)	>2.00	(1.00, 2.00]	(0.50, 1.00]	(0.20, 0.50]	≤0.20	/
有效钼 / (mg/kg) Available Molybdenum (Mo)	>0.30	(0.20, 0.30]	(0.15, 0.20]	(0.10, 0.15]	≤0.10	/

就 pH 值而言,过酸性或过碱性的土壤都将不利于土壤营养元素地固定,所以采用抛物线型隶属度函数,计算公式如下:

$$f(y_i) = \begin{cases} \frac{0.9(y_i - n_1)}{m_1 - n_1} + 0.1 & n_1 < y_i \leq m_1 \\ 1.0 & m_1 < y_i \leq m_2 \\ \frac{0.9(n_2 - y_i)}{n_2 - m_2} + 0.1 & m_2 < y_i \leq n_2 \\ 0.1 & y_i \leq n_1 \text{ 或 } y > n_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: y_i 为样本 i 的 pH 值, 依据分级标准、背景值和新银合欢生长的土壤环境, n_1 、 m_1 、 m_2 、 n_2 分别设定为 4.50、5.56、8.01 和 8.50。

土壤养分指数 (Soil nutrient index, SNI) 计算公式如下:

$$SNI_i = \sum_{k=1}^{16} W_k \times F_k + W_{pH} \times F_{pH} \quad (3)$$

式中: W_k 和 F_k 分别代表第 k 个指标的权重和隶属度。通过 SPSS 因子分析, 取得 17 项指标的公因子方差, 并用各项指标公因子方差除以全部指标公因子方差之和计算得到权重。SNI 的取值范围为 0.10—1.00, 值越接近 1, 表示土壤肥力值越高。计算 0—10 cm 土层与 10—20 cm 土层土壤养分指数的均值, 并采用 Jenks 自然断点分类方法, 将土壤养分指数分为 I—V 级, 当 SNI 小于 0.52 时, 分级为 V 级; 当 SNI 处于 0.52—0.54 间时, 分级为 IV 级; 处于 0.54—0.55 间时, 分级为 III 级; 处于 0.55—0.57 间时, 分级为 II 级; 处于 0.57—0.61 间时, 分级为 I 级。I—II 级为养分保持区, III 级为养分恢复区, IV—V 级为风险防控区^[28]。

1.3.2 基于随机森林的土壤养分空间分布预测和影响因素识别

采用 ArcGIS pro 软件中基于森林的分类和回归工具对土壤养分进行空间预测, 通过现有数据的训练构造可能的预测模型用于水电站库区土壤养分的空间预测^[29]。该模型属于有监督的机器学习算法, 通过创建决策树进行预测, 每棵树生成自己的弱预测, 并作为最终投票方案的一部分来组合成森林, 实现强预测。本研究中, 第一步创建预测模型, 将各采样点 0—10 cm 和 10—20 cm 土层的 SNI 分别设定为预测变量, 将 6 个方面的 21 项环境影响因子作为解释变量, 在气象方面选取年均气温 (X_1)、年均降水 (X_2)、年均湿度 (X_3) 3 个变量, 在土壤性质方面, 选取土壤质地, 即土壤中粉砂 (X_4)、砂土 (X_5)、黏土百分含量 (X_6)、容重 (X_7)、含水率 (X_8)、水蚀系数 (X_9) 等 6 个变量, 在植被方面选取净初级生产力 (X_{10})、归一化植被指数 (X_{11}) 和植被类型 (X_{12}) 3 个变量, 在地形地貌方面选取高程 (X_{13})、坡度 (X_{14})、坡向 (X_{15})、地貌类型 (X_{16}) 4 个变量, 在水文条件方面选取地形湿度指数 (X_{17})、采样点与河流距离 (X_{18}) 2 个变量, 在人类活动影响方面选取采样点与电站距离 (X_{19})、单位面积人口数量 (X_{20}) 和单位面积生产总值 (X_{21}) 3 个变量。人口栅格数据来源为 worldpop 2020 年的中国 1 km 分辨率人口密度数据集 (<https://hub.worldpop.org/project/categories?id=18>), 土壤水分和容重数据来源于国家青藏高原数据中心 (<https://data.tpdc.ac.cn/home>), 与水库和与河流距离, 通过在研究区内创建 1km 格网, 并计算格网中点到最近水库或最近支流的距离计算获得, 其他栅格数据来源为资源环境科学数据平台 (<https://www.resdc.cn/Default.aspx>)。其中, 75% 的样本数据 (21 组) 用于模型预测, 25% 的数据 (7 组) 用于模型检验, 初始决策树的数量设置为 500。第二步, 检验模型稳健型, 计算不确定性以及各变量重要性。第三步, 优化模型筛选重要性较低, 增加决策树的数量到 1000 和 2000, 进行回归诊断, 确定决策树数量为 1000, 并计算得到库区土壤养分的空间分布栅格数据。

2 结果与分析

2.1 库区表层土壤理化性质

表 4 展示了研究区表层土壤各项理化指标的描述性统计结果。就物理性质而言, 土壤 K 值范围处于 0.98%—4.09% 之间, 平均值为 2.07%。土壤 BD 范围处在 0.93—1.74 g/cm³ 之间, 平均值为 1.48 g/cm³, 土壤处于紧实状态。就养分指标来看, pH 范围为 5.18—8.29 之间, 平均值为 7.62, 土壤整体呈现为弱碱性的状态。CEC 介于 4.20—41.70 c mol/kg 之间, 平均值为 9.23, 处于 4 级, 土壤保水保肥能力偏弱。SOM、TK 处于 1 级, TN 处于 2 级。此外, AK 处于 1 级, 养分含量极高, HN 处于 4 级, 养分含量中等, AP 处于 5 级, 养分含量低。通过变异系数反映样本观测值的变异程度, 来分析各指标的离散程度。pH 值的变异系数小于 10%, 表现为弱变异, 空间差异较小。K、CEC、BD、SOM、TK、AK、TP、AP、TN、HN、Mg 和 Mn 的变异系数处于 10—100%, 属于中等强度变异。Ca、Fe、Cu、Zn、B 和 Mo 的变异系数都大于 100%, 属于强变异。

2.2 不同库区表层土壤养分分层差异

图 2 展示了乌东德和白鹤滩库区 0—10 cm 和 10—20 cm 表层土壤养分的差异特征。在乌东德库区, 从

不同区段看,库首区土壤的 TN、B、BD 显著高于库中区,TP 和 Mg 显著高于库尾区,而库首区的 SOM、HN、Mg 和 Mn 显著低于库中地区,K、SOM、Ca 显著低于库尾区,库中区土壤的 Mg 显著高于库尾区,而 Ca 显著低于库尾区。从不同分层看,在库尾区 0—10 cm 土层的 TN、HN、AP 和 Cu 显著高于 10—20 cm 土层。

表 4 库区土壤理化特性描述性统计

Table 4 Descriptive statistics of soil physico-chemical properties in the reservoir area

指标类型 Indicator type	指标 Indicators	单位 Unit	最小值 Minimum	最大值 Maximum	均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数/% Coefficient of variation
物理	K	%	0.98	4.09	2.07	0.71	34.46
Physical indicators	BD	g/cm ³	0.93	1.74	1.45	0.26	17.65
养分	pH	无量纲	5.18	8.29	7.62	0.62	8.18
Nutrient indicators	CEC	c mol/kg	4.20	41.70	16.81	8.91	53.01
	SOM	%	0.54	3.16	1.56	0.70	44.87
	TN	mg/g	0.36	3.11	1.48	0.62	42.04
	TP	mg/g	0.22	1.05	0.53	0.21	38.53
	TK	%	0.77	5.67	2.45	0.94	38.29
	HN	mg/kg	17.50	182.00	72.87	33.98	46.63
	AP	mg/kg	0.34	11.20	4.87	2.84	58.32
	AK	mg/kg	64.00	376.00	210.33	87.96	41.82
	Mg	c mol/kg	0.76	7.21	2.94	1.63	55.32
	Ca	c mol/kg	1.57	120.00	40.85	31.35	76.75
	Fe	mg/kg	2.69	384.00	22.45	56.99	253.90
	Mn	mg/kg	8.32	109.00	31.80	16.81	52.86
	Cu	mg/kg	0.16	21.30	2.40	3.05	126.88
	Zn	mg/kg	0.25	18.10	1.77	2.73	154.67
	B	mg/kg	0.03	0.74	0.21	0.16	73.94
	Mo	mg/kg	0.03	0.85	0.14	0.18	124.28

在白鹤滩库区,从不同区段看,库首区的土壤 HN 显著高于库中区和库尾区,而库首区的 K、pH、TN 和 TP 显著低于库中地区。从不同分层看,在库首区 0—10 cm 土层的 SOM、TN 和 HN 显著高于 10—20 cm 土层,库中区 0—10 cm 土层的 Mo 显著高于 10—20 cm 土层。

对比两个水电站库区发现,乌东德与白鹤滩库区土壤的 Mg、Ca、BD、TN、TP 和 HN 存在显著差异。

2.3 库区土壤养分综合评价

2.3.1 土壤养分指数(SNI)空间分布与分区

土壤养分指数空间分布结果如图 3,0—10 cm 土层土壤养分整体较高,处在 0.53—0.66 范围内,高值出现在乌东德和白鹤滩的库尾区,10—20 cm 土层土壤养分整体处于 0.43—0.58 之间,其中 SNI 高值则出现在水电站的库中区。对比两个水电站库区发现,乌东德库尾区域 0—10 cm 土层的土壤养分,整体高于其库首区域和白鹤滩库区;而在 10—20 cm 土层土壤养分则表现出相反特征,在乌东德库尾区域的土壤养分整体低于其库中、库首和白鹤滩库区。

2.3.2 土壤养分指数(SNI)空间分级与分区

通过自然断点法,将表层和次表层土壤 SNI 的均值分为 5 级,SNI 的空间分级和分区结果如图 4 所示。乌东德水电站的库中区、白鹤滩水电站的库首和库中区总体为土壤养分保持区,乌东德水电站的库首区域总体为养分恢复区,乌东德和白鹤滩水电站的库尾区域总体为土壤养分风险防控区。由此可见,应该加强库尾区域,即两个水电站上游流域的养分保持,避免造成水土流失,影响下游的水电站运行和发展。

2.3.3 土壤养分解释变量重要性

为进一步厘清影响土壤养分的因素,采用随机森林方法,识别 21 个解释变量对土壤养分的重要性大小。

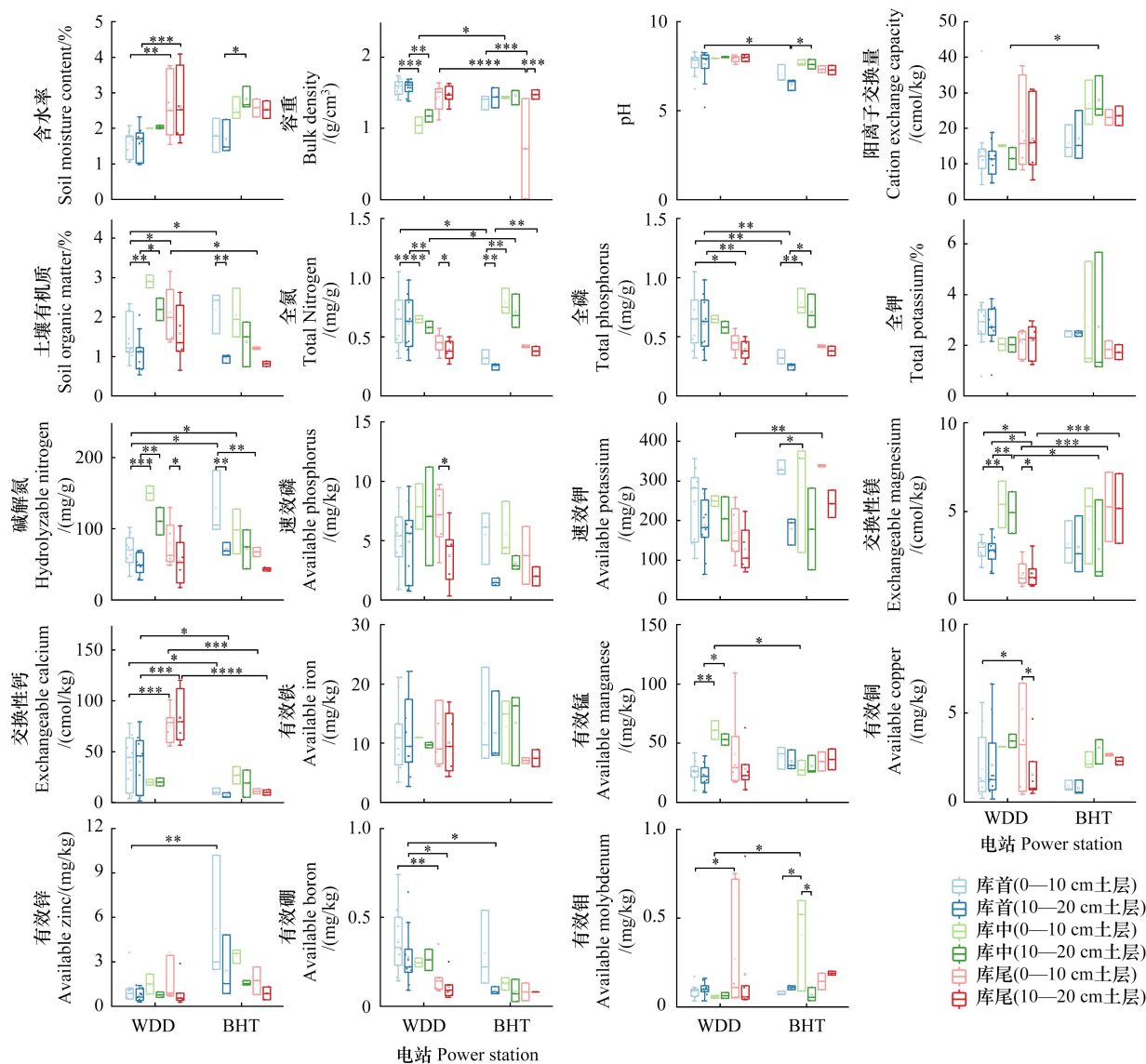


图2 乌东德(WDD)与白鹤滩(BHT)库区土壤养分分层分异特征

Fig.2 Characteristics of soil nutrient stratification in Wudongde (WDD) and Baihetan (BHT) reservoir areas

其中,在拟合 0—10 cm 土层土壤养分指数时,若将 21 个解释变量都纳入考虑,训练集(21 组数据)的 R^2 为 0.773,但验证集(7 组数据)的 R^2 仅为 0.507。为提高预测的可行性,考虑删除重要性排名较低的变量,再进行预测,最终剩余 16 个变量(图 5),训练集的 R^2 提升为 0.779,而验证集的 R^2 提升到 0.829。GDP 的重要性占比最高,为 14%,其次是归一化植被指数、地貌、高程和地形湿度指数,其重要性占比分别为 9%、9%、8%和 7%。此外,土壤属性因素也对土壤养分存在重要影响。

而在拟合 10—20 cm 土壤养分指数时,考虑 21 个解释变量时,训练集的 R^2 为 0.830,验证集的 R^2 为 0.608。筛除 3 个变量后的训练集 R^2 提升为 0.833,验证集 R^2 提升为 0.782。其中,人为活动因素的重要性比重最高,达 26%,其次是土壤属性和地形地貌因素,而植被的重要性相对较小。

3 讨论

3.1 库区土壤养分空间分异特征

本研究系统地评估了干热河谷库区的土壤养分特征。研究结果显示,库区土壤 pH 值普遍呈现弱碱性,

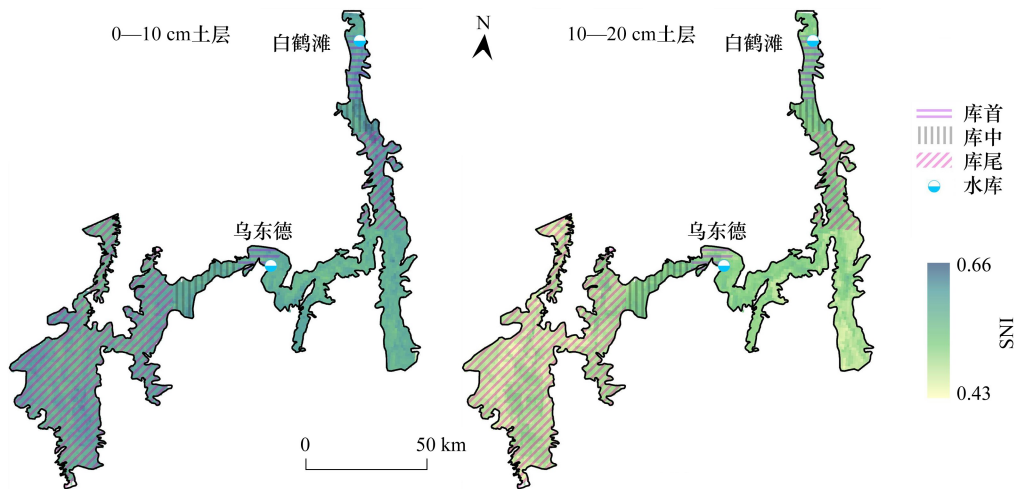


图3 乌东德-白鹤滩土壤养分的空间预测结果

Fig.3 Spatial prediction of soil nutrients in the Wudongde-Baihetan

且为弱变异。一方面可能是因为在水淹干扰增强的情况下,土壤厌氧还原反应加剧,土壤 pH 值升高^[30],另一方面新银合欢群落仍处在演替进程中,随时间推移,未来土壤可能有进一步碱化的趋势^[31]。交换性钙(Ca)、有效铁(Fe)、有效铜(Cu)、有效锌(Zn)、有效硼(B)和有效钼(Mo)等微量元素的变异系数较大,这可能是因为研究区矿产资源丰富^[23],局部地区受采矿业影响,微量元素的值相对偏高。K、CEC、BD、SOM、TK、AK、TP、AP、TN、HN、交换性镁(Mg)和有效锰(Mn)呈现出中等强度变异,表明不同程度上受到人为干扰。

本研究发现梯级水电库区土壤养分表现出明显的空间分异特征,10—20 cm 土层的含水率、容重和可交换性镁含量通常高于 0—10 cm 土层,而其他养分指标,如有机质、全氮和速效磷则在上层土壤中更为丰富,这可能与上层土壤更容易受到根系分泌物影响,以及表层土壤根际微生物对养分的快速吸收和转化有关^[32]。在横向上,土壤 pH 值、有机质和全氮在乌东德(WDD)和白鹤滩(BHT)两个水电站库区的变化趋势存在显著差异。WDD 库区的土壤 pH 值和全氮含量在库中最高,而 BHT 库区则在库首最高,这种差异可能与水电站影响有关。

3.2 库区土壤养分空间分异原因

本研究发现,0—10 cm 土层的土壤养分指数(SNI)在乌东德和白鹤滩的库首和库中区 SNI 值较高,而在库尾区域较低,在众多影响因素中,国民经济发展、水电站建设、人口密度和植被在其中起到重要作用。根据栅格发现,研究区库首和库中区的 NDVI 值相较于库尾较高,说明植被的种植有利于土壤养分恢复。相关研究表明,植被通过提供有机物输入和减少土壤侵蚀,有助于提高表层土壤养分水平^[33]。栅格中库尾区的社会经济发展水平和人口密度相对较高,说明随着人类社会经济活动可能会使得土壤养分下降^[34]。此外,气温、

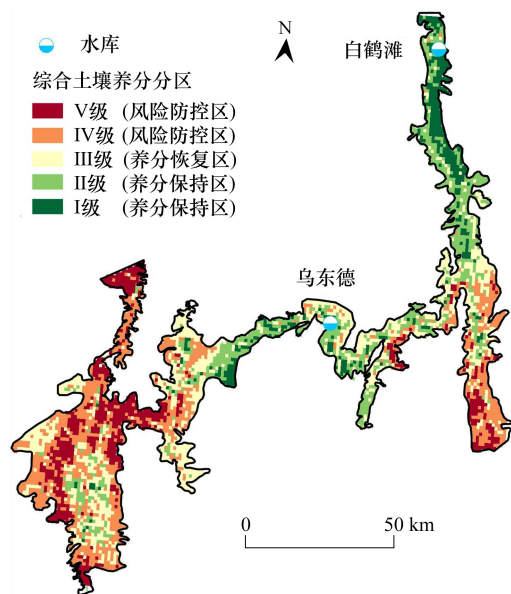


图4 乌东德-白鹤滩土壤养分的空间分区结果

Fig.4 Spatial partition of soil nutrients in the Wudongde-Baihetan

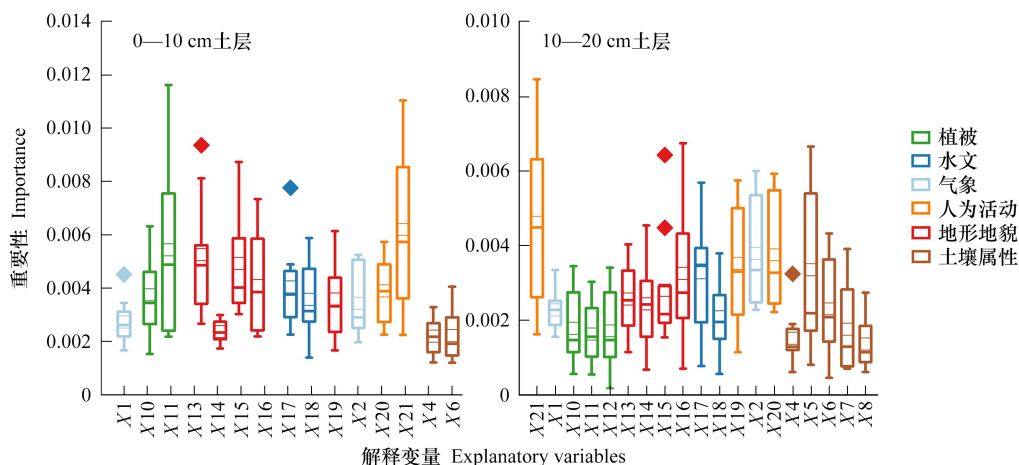


图5 不同土层土壤养分影响因素的重要性排序

Fig.5 The importance ranking of factors affecting soil nutrient content in different soil layers

X17:单位面积 GDP, X16:单位面积人口, X15:地形湿度指数, X2:年均降水, X5:砂土含量, X14:地貌类型, X11:高程, X10:坡度, X13:坡向, X7:水蚀系数, X1:年均气温, X8:NPP, X4:粉砂含量, X6:黏土含量, X9:植被指数, X3:年均湿度, X10:植被类型

降水和地表径流,通过影响土壤有机质矿化和养分沉积,进而影响表层土壤养分分布^[35]。

与表层相比,10—20 cm 土层的 SNI 高值主要集中在库尾区,随机森林模型的验证表明,次表层土壤养分分布主要受人为活动、土壤属性及地形地貌因素影响,如坡度较大的区域养分易流失,而平缓区域更有利于养分积累^[36]。而气象和植被因子作用较小。这可能是因为次表层土壤对短期环境变化响应较慢,受表层土壤的间接作用影响更大^[37]。

3.3 库区土壤养分分层与分区管理

本研究发现乌东德水电站库中与白鹤滩水电站库首、库中区段土壤养分指数值(SNI)介于 0.55—0.61 之间,处于 I—II 级,属于养分保持区。对于乌东德水电站库中区段需要注意全钾和交换性钙的保持。白鹤滩水电站库首区段需特别关注全氮、全磷、交换性钙、有效铜和有效钼的保持,库中区段则需关注有效锰的保持。乌东德水电站库首与白鹤滩水电站库尾区段, SNI 主要介于 0.54—0.55 之间,处于 III 级,属于养分恢复区。水库建设后这些区域土壤中的关键养分经历流失或重新分配,目前正处于需要恢复的阶段,尤其是有机质、碱解氮和微量元素的恢复,缺乏这些关键养分会直接影响植物的生长^[38—39]。具体而言,土壤中的有机质直接影响植物的根系发育^[40],而微量元素如铁、锌等对植物的生理功能至关重要^[41]。如果这些养分得不到有效恢复,将对研究区内的新银合欢等物种产生负面影响。而植被生长是边坡修复的关键^[42],养分不足会影响植物生长和整个生态系统的养分循环,进一步加剧水土流失^[43]。乌东德水电站库尾区段 SNI 介于 0.43—0.54 之间,处于 IV—V 级,属于养分风险防控区。该区域土壤的全氮、全磷、全钾、速效钾、交换性镁、有效锌和有效硼含量,与整个研究区相比较小。这些养分的缺乏,不仅限制了植被的自然恢复,还可能通过土壤-植物-微生物的相互作用,加剧土壤健康的恶化^[44]。

此外,值得注意的是,空间预测的结果显示,从河谷到坡地,随着海拔的升高,土壤养分指数下降,这表明坡度大小也会影响土壤养分含量。研究表明,在水电站扰动区,沿坡体从上至下,土壤养分依次增加,坡度和坡向会影响土壤内环境变化。可见,对于不同地形地貌特征和坡度的区域,应选择合适的植被和适宜的土壤养分恢复方式进行生态修复。金沙江干热河谷植被稀疏,滑坡和泥石流频发,在坡度较大的耕地,实施退耕还林,开展乔灌草恢复性修复,在坡度较缓的耕地,采取果农、果蔬和果牧模式建设,能够增加生物多样性,有效控制水土流失^[45]。

3.4 模型不确定性与优化

在模型训练时,通过调整解释变量组成和树数实现模型优化。在验证数据占比 25% 的情况下,设置树数为

500、1000、2000 进行比较,发现 1000 树数时,验证数据 R^2 为 0.779,相较于 500 树数时的 0.776, R^2 有提高 0.39%, 2000 树数时 R^2 为 0.780,相较于 1000 树数时没有明显变化,所以在本研究模型运算时,均采用 1000 树数。

本研究系统地对比了上下游水电站及同一库区内不同位置(库首、库中、库尾)的土壤养分状况,揭示了梯级水电库区土壤养分空间分异特征。然而,研究存在样本数量和水电站范围有限的问题,这可能影响结果的普适性。此外,由于缺乏长时间序列的数据,无法对水电的影响进行全面评估。未来研究将进一步扩大样本量,结合遥感监测和模型模拟等方法,深入探讨水电开发的长期影响,为制定有效的土壤管理措施和生态修复提供科学依据。

4 结论

本研究通过分析金沙江下游乌东德和白鹤滩水电库区的土壤养分特征,揭示了库区土壤养分的空间分异规律及其影响因素的重要性,并提出了相应的分区管理策略。研究结果显示,库区土壤普遍呈弱碱性,且受到水淹干扰和矿产资源开发的影响,土壤 pH 值和微量元素的变异性较大。土壤养分在空间上表现出明显的分异特征,库区表层(0—10 cm)土壤的有机质和全氮等养分较为丰富,在库首和库中的表层土壤养分指数较高,植被因素发挥着重要作用,需继续保持植被覆盖,在库尾应控制社会经济发展对土壤养分的影响。次表层土壤则主要受土壤属性及地形因素的影响,对于坡度较大的区域应采取相应的生态修复措施,有效控制水土流失。此外,本研究还指出,模型的优化和验证过程存在一定的不确定性,未来应结合遥感监测和更多样本数据,进一步评估水电开发的长期影响,为制定更为精准的土壤管理和生态修复策略提供科学依据。

致谢:感谢中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所张信宝研究员、中国地质科学院岩溶地质研究所于奭研究员、国家自然科学基金委员会地球科学部高阳副研究员、云南大学生态与环境学院陈哲副研究员对研究给予的帮助。

参考文献(References):

- [1] 张月华,张凤英,邓鑫欣,于江,肖欣怡,潘开文,张林. 农业耕作和外来植物入侵对金沙江下游库区新生消落带土壤养分和酶活性的影响. 环境科学研究, 2024, 37(6): 1315-1325.
- [2] 刘娇,郎学东,苏建荣,刘万德,刘华妍,田宇. 基于 InVEST 模型的金沙江流域干热河谷区水源涵养功能评估. 生态学报, 2021, 41(20): 8099-8111.
- [3] 周扬,杨珺. 梯级水电开发对金沙江干流生态环境的累积影响. 人民珠江, 2024, 45(12): 39-47.
- [4] 孙然好,何晓银,孙龙,孙涛,钟荣华,段兴武,陈利顶. 流域水电开发对干热河谷社会-生态系统的影响及意义. 生态学报, 2023, 43(14): 5639-5647.
- [5] 孙干,孙然好,徐火清,孙龙,董一帆,孙涛,陈利顶. 干热河谷梯级库区土壤微生物群落特征及其影响因素研究. 长江流域资源与环境, 2023, 32(3): 507-515.
- [6] Bünenmann E K, Bongiorno G, Bai Z G, Creamer R E, De Deyn G, de Goede R, Flesskens L, Geissen V, Kuypers T W, Mäder P, Pulleman M, Sukkel W, van Groenigen J W, Brussaard L. Soil quality: A critical review. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 120: 105-125.
- [7] 辛志远,夏建国. 瀑布沟水库消落带土壤有机碳空间分布特征. 中国水土保持科学: 中英文, 2020, 18(6): 90-98.
- [8] Sarvade S, Gupta B, Singh M. Composition, diversity and distribution of tree species in response to changing soil properties with increasing distance from water source—a case study of Gobind Sagar Reservoir in India. Journal of Mountain Science, 2016, 13(3): 522-533.
- [9] Chen Q W, Shi W Q, Huisman J, Maberly S C, Zhang J Y, Yu J H, Chen Y C, Tonina D, Yi Q T. Hydropower reservoirs on the upper Mekong River modify nutrient bioavailability downstream. National Science Review, 2020, 7(9): 1449-1457.
- [10] 唐凤珍,顾圣平,张佳丹,郑斯水,马志鹏. 基于数据挖掘模型的梯级水电站效益关联探索. 人民黄河, 2020, 42(6): 143-147.
- [11] 魏国良,李帷,汪萍,徐海峰. 澜沧江水电开发对河岸带土壤养分分布的影响. 水土保持研究, 2014, 21(2): 47-52.
- [12] Celestina C, Hunt J R, Sale P W G, Franks A E. Attribution of crop yield responses to application of organic amendments: a critical review. Soil and Tillage Research, 2019, 186: 135-145.
- [13] 张勇强,李智超,厚凌宇,宋立国,杨洪国,孙启武. 林分密度对杉木人工林下物种多样性和土壤养分的影响. 土壤学报, 2020, 57(1): 239-250.

- [14] 张勇强. 杉木林下植物功能群构建及其对土壤性质的影响[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2020.
- [15] 姜冰, 王松涛, 孙增兵, 张海瑞, 刘阳, 刘倩. 山东省青州市土壤养分元素有效量及其影响因素. 土壤, 2021, 53(6): 1221-1227.
- [16] 曹文宣. 长江上游水电梯级开发的水域生态修复问题. 长江技术经济, 2019, 3(2): 5-10.
- [17] 任斐鹏, 张平仓, 陈小平, 徐平, 陈进. 金沙江干流植被空间异质性及其对生态恢复的影响分析. 长江科学院院报, 2016, 33(1): 24-29.
- [18] Sun L, Sun R H, Chen L D, Sun T. Sensitive indicators of soil nutrients from reservoir effects in the hot-dry valleys of China. Catena, 2022, 216: 106421.
- [19] 刘芬良. 晚新生代金沙江下游段地貌演化与河谷发育研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [20] 刘令军. 气候变化条件下金沙江梯级水电站发电能力变化研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- [21] 曹涛, 周蓓蓓, 吴山山, 赵宇航, 崔磊, 夏振尧, 任远, 姚少雄. 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.
- [22] 李会中, 段伟锋, 王团乐. 金沙江乌东德水电站金坪子滑坡成因机制分析与稳定性评价. 资源环境与工程, 2005, 19(4): 293-301.
- [23] 宋丽. 川西干热河谷铅锌矿尾矿库区表层土壤—微生物作用关系及其植被恢复优化模式研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- [24] 赵洛琪, 吴晓妮, 付登高, 徐子萱, 朱安琪. 滇池流域磷矿山区优势植物叶片与土壤养分生态化学计量特征. 土壤, 2021, 53(2): 383-390.
- [25] 全国土壤普查办公室. 中国土壤. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [26] 张江周, 刘亚男, 高伟, 王蓓蓓, 阮云泽. 我国香蕉园土壤肥力现状的整合分析. 热带作物学报, 2022, 43(7): 1401-1410.
- [27] 张连金, 赖光辉, 孙长忠, 辛学兵, 孔庆云. 北京九龙山土壤质量综合评价. 森林与环境学报, 2016, 36(1): 22-29.
- [28] 方恺, 许安琪, 何坚坚, 方创琳, 刘庆燕. “一带一路”沿线国家可持续发展综合评估及分区分管. 科学通报, 2021, 66(19): 2441-2454.
- [29] 凌晓丹, 王罗其, 赵科理, 傅伟军, 叶正钱, 丁立忠. 基于随机森林法的山核桃林地土壤速效养分含量空间分布特征研究. 生态学报, 2024, 44(2): 662-675.
- [30] 钟松雄, 何宏飞, 陈志良, 尹光彩, 林亲铁, 黄玲, 王欣, 刘德玲. 水淹条件下水稻土中砷的生物化学行为研究进展. 土壤学报, 2018, 55(1): 1-17.
- [31] 郭甜, 何丙辉, 蒋先军, 马云, 吴咏, 向明辉, 湛芸, 唐春霞. 新银合欢篱对紫色土坡地土壤有机碳固持的作用. 生态学报, 2012, 32(1): 190-197.
- [32] Ma H C, McConchie J A. The dry-hot valleys and forestation in southwest China. Journal of Forestry Research, 2001, 12(1): 35-39.
- [33] 胡宜刚, 张鹏, 赵洋, 黄磊, 虎瑞. 植被配置对黑岱沟露天煤矿区土壤养分恢复的影响. 草业科学, 2015, 32(10): 1561-1568.
- [34] Bhattacharyya R, Bhatia A, Ghosh B N, Santra P, Mandal D, Kumar G, Singh R J, Madhu M, Ghosh A, Mandal A K, Paul R, Datta A, Sharma P C, Mandal U K, Jha P, Anil K S, Lalitha M, Kumar M, Panwar N R, Sarkar D, Patra A K, Kundu S, Fullen M A, Poesen J, Das B S, Reddy N N, Chaudhari S K. Soil degradation and mitigation in agricultural lands in the Indian Anthropocene. European Journal of Soil Science, 2023, 74(4): e13388.
- [35] Das S, Deb S, Sahoo S S, Sahoo U K. Soil microbial biomass carbon stock and its relation with climatic and other environmental factors in forest ecosystems: a review. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(6): 933-945.
- [36] Chen Z X, Guo M M, Zhou P C, Wang L X, Liu X, Wan Z K, Zhang X Y. Gully regulates snowmelt runoff, sediment and nutrient loss processes in Mollisols region of NorthEast China. Science of the Total Environment, 2024, 940: 173614.
- [37] Mu Y T, Ye R C, Xiong K N, Li Y, Liu Z Q, Long Y D, Cai L L, Zhou Q P. Response of soil organic carbon to land-use change after farmland abandonment in the Karst desertification control. Plant and Soil, 2024, 501(1): 595-610.
- [38] Shrivastav P, Prasad M, Singh T B, Yadav A, Goyal D, Ali A, Dantu P K. Role of nutrients in plant growth and development. Contaminants in Agriculture: Sources, impacts and management, 2020: 43-59.
- [39] Luo H, Liu S S, Song Y F, Qin T L, Xiao S B, Li W, Xu L L, Zhou X X. Effects of waterlogging stress on root growth and soil nutrient loss of winter wheat at seedling stage. Agronomy, 2024, 14(6): 1247.
- [40] 陈东, 王道杰, 郭灵辉, 陈晓艳. 水分胁迫及土壤质地对新银合欢幼苗根系生长的影响. 中国水土保持, 2012(6): 34-37.
- [41] George T S, French A S, Brown L K, Karley A J, White P J, Ramsay L, Daniell T J. Genotypic variation in the ability of landraces and commercial cereal varieties to avoid manganese deficiency in soils with limited manganese availability: is there a role for root-exuded phytases? Physiologia Plantarum, 2014, 151(3): 243-256.
- [42] 杨悦舒, 夏振尧, 肖海, 陈毅. 恢复生态学理论在水电工程扰动区边坡生态修复中的应用. 长江科学院院报, 2015, 32(7): 52-57.
- [43] 闫帮国, 刘刚才, 樊博, 何光熊. 干热河谷植物化学计量特征与生物量之间的关系. 植物生态学报, 2015, 39(8): 807-815.
- [44] Baldi E. Soil-plant interaction: effects on plant growth and soil biodiversity. Agronomy, 2021, 11(12): 2378.
- [45] 李婷, 吕一河, 任艳姣, 李朋飞. 黄土高原植被恢复成效及影响因素. 生态学报, 2020, 40(23): 8593-8605.