

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.04.028

引用格式:周楠,毛旭烽,于红妍,等.祁连山国家公园高寒沼泽湿地土壤肥力空间分异及其影响因素[J].草地学报,2026,34(4):1471-1482

ZHOU Nan, MAO Xu-feng, YU Hong-yan, et al. Spatial Differentiation of Soil Fertility and Its Influencing Factors in Alpine Marsh Wetlands of Qilian Mountain National Park[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(4):1471-1482

祁连山国家公园高寒沼泽湿地土壤肥力空间分异及其影响因素

周楠^{1,2}, 毛旭烽^{1,2*}, 于红妍³, 唐文家⁴, 张乐乐^{1,2}, 金鑫^{1,2}, 金彦香^{1,2}, 杨永潇^{1,2}

(1. 青藏高原自然地理与生态保育教育部重点实验室, 青海省自然地理与环境过程重点实验室, 青海 西宁 810008;

2. 青海师范大学地理科学学院, 青海 西宁 810008; 3. 祁连山国家公园青海服务保障中心, 青海 西宁 810008;

4. 青海省生态环境厅, 青海 西宁 810007)

摘要:为揭示高寒沼泽湿地不同退化阶段土壤肥力特征及空间分异机制,选取青海祁连山国家公园未退化、轻度退化和中度退化湿地共84个样方,采用改进内梅罗指数和主成分分析评估土壤肥力,并运用地理探测器量化环境因子对其空间异质性的影响。结果表明:各退化阶段土壤均处于肥沃等级,其中未退化湿地综合肥力最高(2.03),轻度(1.87)和中度退化(1.83)略有下降,全氮是主要限制因子。随着退化加剧,土壤有机质含量、阳离子交换量、全氮和全磷含量逐渐降低,全钾含量升高;除全钾含量外,各指标随土层加深而下降。地理探测表明,年均降水量($q=0.741$)、海拔($q=0.403$)和年均气温($q=0.402$)是影响土壤肥力空间分异的主导因子;多因子交互中,年均降水与气温($q=0.897$)、气温与归一化差分植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)($q=0.870$)的组合对土壤肥力空间格局解释力最强。研究结果可为高寒沼泽湿地退化诊断与生态恢复提供理论依据。

关键词:高寒沼泽湿地;土壤肥力;地理探测器;空间异质性;祁连山国家公园

中图分类号:S158

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)04-1471-12

Spatial Differentiation of Soil Fertility and Its Influencing Factors in Alpine Marsh Wetlands of Qilian Mountain National Park

ZHOU Nan^{1,2}, MAO Xu-feng^{1,2*}, YU Hong-yan³, TANG Wen-jia⁴, ZHANG Le-le^{1,2}, JIN Xin^{1,2},
JIN Yan-xiang^{1,2}, YANG Yong-xiao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Natural Geography and Ecological Conservation on the Qinghai-Tibet Plateau, Key Laboratory of Natural Geography and Environmental Processes, Xining, Qinghai Province 810008, China; 2. College of Geographical Sciences, Qinghai Normal University, Xining, Qinghai Province 810008, China; 3. Service and Support Center of Qilian Mountain National Park, Qinghai Province, Xining, Qinghai Province 810008, China; 4. Qinghai Provincial Department of Ecology and Environment, Xining, Qinghai Province 810007, China)

Abstract: To reveal the characteristics and spatial differentiation mechanisms of soil fertility at different degradation stages of alpine marsh wetlands, 84 plots were selected in this study, including non-degraded, lightly degraded, and moderately degraded wetlands in Qilian Mountain National Park, Qinghai. An improved Nemrow index and principal component analysis were used to evaluate soil fertility, and the geographical detector model was employed to quantify the influence of environmental factors on its spatial heterogeneity. The results showed that soils at all degradation stages were within the fertile level. The comprehensive fertility index was the highest in non-degraded wetlands (2.03), slightly decreasing in lightly (1.87) and moderately degraded wetlands (1.83), with total nitrogen being identified as the main limiting factor. As degradation intensified,

收稿日期:2025-07-06;修回日期:2025-08-30

基金项目:国家自然科学基金(42201174);青海省科技厅自然科学基金(2024-ZJ-910)资助

作者简介:周楠(1996-),女,汉族,江苏徐州人,硕士研究生,主要从事湿地生态过程研究,E-mail:18709785087@163.com;*通信作者
Author for correspondence, E-mail: maoxufeng@yeah.net

soil organic matter, cation exchange capacity, total nitrogen, and total phosphorus gradually decreased, whereas total potassium increased. Except for total potassium, all indicators declined with soil depth. Geographical detection revealed that mean annual precipitation ($q=0.741$), altitude ($q=0.403$), and mean annual temperature ($q=0.402$) were the dominant factors influencing the spatial differentiation of soil fertility. Among the multi-factor interactions, the combinations of mean annual precipitation and temperature ($q=0.897$), and temperature and NDVI ($q=0.870$) showed the strongest explanatory power for the spatial pattern of soil fertility. These findings provide a theoretical basis for degradation diagnosis and ecological restoration of alpine marsh wetlands.

Key words: Alpine marsh wetland; Soil fertility; Geographic detector; Spatial heterogeneity; Qilian Mountain National Park

高寒沼泽湿地主要分布于高海拔寒冷地区,是适应高寒气候、具有泥炭积累特征的重要湿地类型。该类湿地在全球碳循环、水文调节及维持生态系统稳定性方面具有重要的生态功能^[1-3]。土壤作为湿地生态系统的核心组成部分,其肥力状况不仅影响植物群落结构与生物量分布,还直接关系到生态系统的物质循环效率与稳定性^[4]。高寒沼泽湿地常年处于过湿还原环境,丰富的有机质积累和复杂的养分循环等过程,共同形成了独特的土壤肥力特征。对其土壤肥力的评价不仅是对土壤本身属性的探究,更是对湿地生态系统健康状况的全面诊断。青海省湿地资源丰富,天然湿地面积占全省湿地面积的98%,其中沼泽湿地分布最为广泛。然而,受气候变化和人类干扰的双重影响,沼泽湿地普遍面临不同程度的退化^[5-6],其演变通常经历由沼泽、沼泽化草甸、典型草甸到退化草甸的退化序列^[7],同时水文条件由长期积水逐渐转变为季节性积水甚至干涸,植被群落也随之由湿生型向中生型和旱生型更替。这一过程显著影响了土壤水分、有机质含量、微生物活性与养分供给能力,进而造成土壤肥力的变化。

土壤的形成和演变过程较为复杂,受自然及人为因素影响,土壤性质表现出空间异质性。土壤肥力主要由其理化属性所决定,而这些属性又受到气候、地形等外部环境因子的影响。根据前人提出的成土五因子理论,气候、地形、生物、母质和时间共同决定了土壤的形成过程及其特性演变^[8]。其中,气候因子作为主导变量,在高寒湿地区通过控制风化速率、有机质分解与微生物活动,对养分的积累与循环产生间接却重要的影响。已有研究表明,气温升高会增强有机质矿化与氮素释放,导致土壤碳氮含量下降;降水格局的改变及极端气候事件如干旱或洪涝,则通过破坏湿地水文平衡,加剧养分淋溶与迁移,引发土壤退化与养分流失^[9-10]。此外,土

地利用方式改变对湿地植被结构、水分条件和土壤团聚体稳定性造成扰动,也会显著影响土壤肥力维持过程^[11-12]。

祁连山国家公园青海片区内分布着典型的沼泽湿地生境,对于维护区域生态平衡具有重要作用。目前有关祁连山国家公园土壤方面的研究主要集中在土壤特征与植被之间的关系、土壤微生物多样性和土壤水力侵蚀等方面^[13-15],关于湿地土壤肥力的研究相对有限,现有成果主要聚焦于养分变化规律及土壤属性特征的分析。已有研究表明,拉萨河下游湿地土壤具有较强的养分保持能力,整体肥力水平较高,其中全钾含量为主要影响因子^[16]。麦地卡湿地中,沼泽土的土壤肥力水平低于高山草甸土,反映出特殊生态环境下的肥力维持机制存在差异性^[17]。此外,关于土壤肥力空间格局及其驱动因素的研究多集中于耕地等典型的人工生态系统,如高浩然等^[18]分析了两类地形区耕地土壤肥力空间格局及其影响因素,结果表明降水量、年均气温、道路用地、坡度和坡向为主要影响因子;王翔宇等^[19]研究指出,畜禽养殖活动、土壤pH值、土壤质地、年均气温以及地表起伏度是农田土壤肥力的关键控制因素。这些研究虽为理解土壤肥力的空间变异特征提供了理论依据,但针对湿地生态系统,尤其是高寒湿地土壤肥力空间分异格局与影响因子的研究仍显不足,特别是在区域尺度上识别主控环境因子及其交互作用方面尚缺乏系统研究,亟需进一步深入探讨。因此,本研究以青海祁连山国家公园典型高寒沼泽湿地为研究区域,选取未退化、轻度退化和中度退化三种不同退化阶段的样地,基于实地样地采样,采用改进的内梅罗指数法结合主成分分析,对不同退化程度及土层深度下的土壤肥力进行综合评价。在此基础上,引入地理探测器模型,定量识别气候、地形、水文等环境因子及其交互作用对土壤肥力空间分异格局的主导驱动作用。研究旨在

阐明高寒沼泽湿地退化过程中土壤肥力的演变特征与主控因子,为高寒湿地生态系统健康评估与退化湿地修复管理提供科学依据与理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

祁连山国家公园位于青海省东北部和甘肃省西南部,总面积5.02万 km^2 ,其中青海片区面积为

1.58万 km^2 ,占总面积的31.5%(图1)。青海片区位于 $37^{\circ}19' \sim 38^{\circ}38' \text{N}$, $99^{\circ}20' \sim 102^{\circ} \text{E}$,平均海拔在4000 m以上,行政范围涉及海北藏族自治州祁连县、门源县以及海西蒙古族藏族自治州德令哈市和天峻县部分地区。该区域自然景观类型丰富,涵盖森林、湿地、草原和冰川等多种生态系统。土壤与植被类型多样,土壤类型以沼泽土、草甸土等为主,植物群落类型以藏嵩草(*Kobresia tibetica*)、华扁穗草(*Blysmus sinocompressus*)等为优势种^[20-21]。

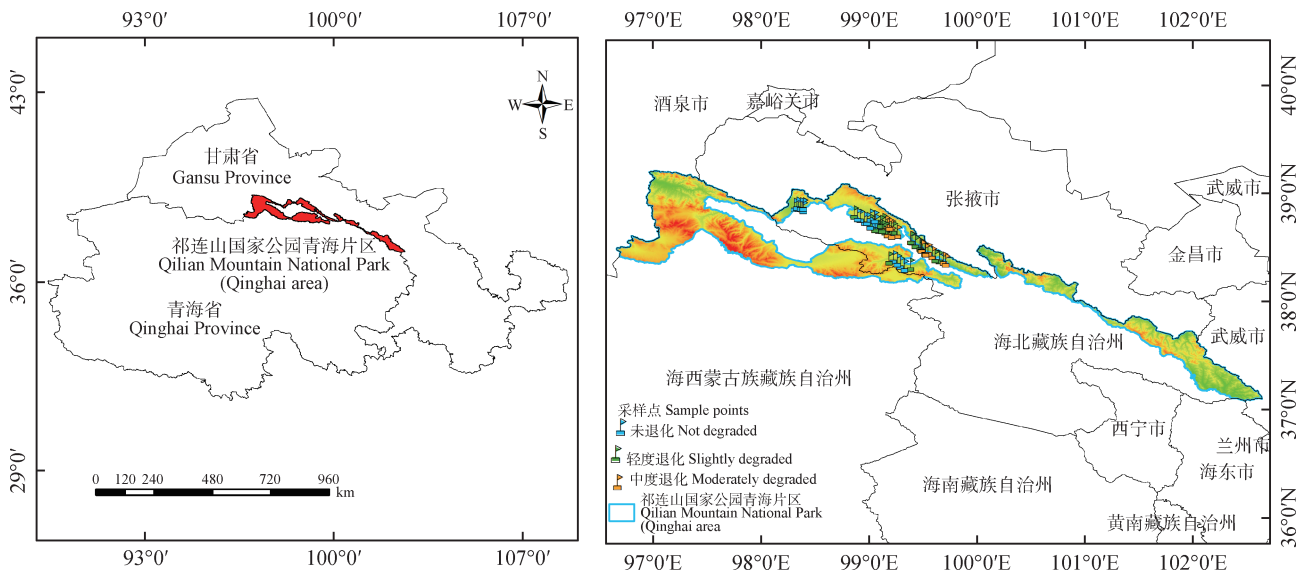


图1 研究区位置及样点分布示意图

Fig. 1 Location of study area and distribution of sample points

注:该图由自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2023)2767号标准地图制作,底图无修改

Note: This map is produced from the standard map downloaded from the Standard Map Service Website of the Ministry of Natural Resources, with the map review number GS(2023)2767. The base map has not been modified

1.2 土壤样品的采集与处理

于2023年和2024年7月植被生长旺盛期对祁连山国家公园青海片区开展土壤和植被采样。根据《青海省高寒沼泽湿地退化等级划分标准》(DB63/T 1794—2020)^[22],结合实地调查获得的积水面积、植物群落结构与土壤类型等特征信息,在研究区内选取不同退化等级的典型样方,其中未退化样方36个(Not degraded, ND)、轻度退化样方27个(Slightly degraded, SD)、中度退化样方21个(Moderately degraded, MD),共计84个样方(每个样方面积为 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$),代表3种退化阶段的高寒沼泽湿地类型。在每个样方内,记录样方经纬度、海拔、积水状况、植物类型、优势种组成及地上生物量等基本信息(表1)。用手持式土钻分别采集0~10 cm、10~20 cm和20~30 cm土壤样品,每个样方内3个重复,混合均匀后作为该样点的供试土壤样品。将供试土壤自然风干,并

拣去草根、砾石,然后研磨过筛,用于土壤养分分析。每项指标均设置3次平行重复,以保证结果的准确性与重复性。其中,pH值测定采用电位法,土壤有机质(Soil organic matter, SOM)含量测定采用重铬酸钾氧化-外加热法,全氮(Total nitrogen, TN)含量测定采用凯氏法,全磷(Total phosphorus, TP)含量测定采用碱熔-钼锑抗分光光度法,全钾(Total potassium, TK)含量测定采用氢氧化钠熔融和火焰光度法,阳离子交换量(Cation exchange capacity, CEC)测定采用EDTA-乙酸铵交换法^[23]。

1.3 研究方法

1.3.1 土壤综合肥力 改进的内梅罗指数法是一种用于综合评价土壤肥力的优化方法,通过引入分肥力指标的平均值与最小值及修正项,在减少极端值影响的基础上提升了土壤肥力评价的客观性与

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic information of the sample plots

退化程度 Degradation degree	植物优势种 Dominant plant species	水文状况 Hydrological condition	土壤类型 Soil type	分布区域 Distribution area
未退化 Not degraded	藏嵩草(<i>Kobresia tibetica</i>)、华扁穗草(<i>Blysmus sinocompressus</i>)、黑褐苔草(<i>Carex atrofusca</i>)等湿生植物	常年积水或土壤过湿 Perennial waterlogging or excessive soil moisture	泥炭土 Peat soil、沼泽土 Marsh soil	低洼积水区、河漫滩等区域,排水极差 Low-lying waterlogged areas and river flood-plains with extremely poor drainage
轻度退化 Slightly degraded	藏嵩草(<i>Kobresia tibetica</i>)等湿生植物数量减少,矮生嵩草(<i>Kobresia humilis</i>)、线叶嵩草(<i>Kobresia capillifolia</i>)等湿生与中生植物混合	季节性积水或土壤湿润 Seasonal waterlogging or moist soil conditions	草甸沼泽土 Meadow marsh soil	沼泽边缘或轻微抬升区域,排水条件改善但仍受限 At the edges of swamps or slightly elevated areas, drainage conditions are improved but still limited
中度退化 Moderately degraded	青藏苔草(<i>Carex moorcroftii</i>)、高山嵩草(<i>Kobresia pygmaea</i>)、垂穗披碱草(<i>Elymus nutans</i>)等中生植物数量增多	土壤湿润但无长期积水 Moist but not persistently waterlogged soil	草甸土 Meadow soil、潜育土 Gley soil	河流阶地、山前坡地等地势较高或排水良好的区域 Areas with relatively higher topography or favorable drainage, including river terraces and piedmont slopes

准确性^[24]。在进行综合评价前,需依据相关分级标准对各肥力指标进行标准化处理,以消除不同属性间的量纲差异。本研究参照全国第二次土壤普查中的土壤属性分级标准,对所选参评指标进行标准化(表 2),将土壤属性分为差($C_i \leq X_a$)、中等($X_a < C_i \leq X_b$)、较好($X_b < C_i \leq X_c$)和好($C_i > X_c$)四级,通过分段函数赋予不同得分(F_i),以反映其供肥能力和生态功能。该方法实现指标无量纲化,增强可比性与综合性, F_i 值递进有序,并通过上限控制有效减弱极端值干扰,为综合评价提供稳定可靠的数据基础^[25]。

表 2 土壤各属性分级标准

Table 2 Grading standards for various soil attributes

土壤属性 Soil property	X_a	X_b	X_c
有机质 SOM/(g·kg ⁻¹)	10	20	30
阳离子交换量 CEC/(cmol·kg ⁻¹)	5	10	15
全氮 TN/(g·kg ⁻¹)	0.75	1.50	2.00
全磷 TP/(g·kg ⁻¹)	0.4	0.6	1.0
全钾 TK/(g·kg ⁻¹)	5	20	25
pH 值(≤ 7.0)	4.5	5.5	6.5
pH 值(> 7.0)	9.0	8.0	7.0

注: X_a , X_b , X_c 为属性的分级指标

Note: X_a , X_b , and X_c are the grading indicators for the attributes

本研究采用的评价指标为 SOM, CEC, TN, TP, TK 和 pH 值。方法具体如下^[25]:

当属性值属于差一级时,即 $C_i \leq X_a$:

$$F_i = \frac{C_i}{X_a} (F_i \leq 1) \quad (1)$$

当属性值属于中等一级时,即 $X_a < C_i \leq X_b$:

$$F_i = 1 + \frac{C_i - X_a}{X_b - X_a} (1 < F_i \leq 2) \quad (2)$$

当属性值属于较好一级时,即 $X_b < C_i \leq X_c$:

$$F_i = 2 + \frac{C_i - X_b}{X_c - X_b} (2 < F_i \leq 3) \quad (3)$$

当属性值属于好一级时,即 $C_i > X_c$ ($F_i = 3$) (4)

式中: F_i 为分肥力系数, C_i 为属性测定值。

通过上述方法将本研究各指标进行标准化后,得到的各分肥力系数便于进一步地对比和计算。最后采用修正的内梅罗计算公式进行综合肥力的计算:

$$F = \sqrt{\frac{\bar{F}_i^2 + F_{imin}^2}{2}} \times \left(\frac{n-1}{n} \right) \quad (5)$$

式中: F 为土壤综合肥力; F_i 为土壤各属性分肥力系数的平均值; F_{imin} 为土壤各属性分肥力系数的最小值; n 为参与评价的土壤属性个数。土壤肥力分级标准为: 当 $F \geq 2.5$ 时, 说明土壤处于很肥沃状态; 当 $1.7 \leq F < 2.5$ 时, 说明土壤处于肥沃状态; 当 $0.8 \leq F < 1.7$ 时, 说明土壤肥力一般; 当 $F < 0.8$ 时, 说明土壤贫瘠。

1.3.2 土壤肥力指数 主成分分析法 (Principal component analysis, PCA) 适合处理多变量数据, 能够提取主要成分并消除指标间的相关性, 运用 SOM, SMC, CEC, TN, TP 和 TK 这 6 个土壤肥力指标来计算研究区土壤肥力指数 (Soil fertility index, SFI), 计算之前需对数据进行标准化处理, 消除量纲影响^[26-27]。本研究中, 通过主成分分析, 前 2 主成分累计解释率为 83.45%, 满足指标降维要求。具体计算公式如下:

通过 PCA 提取主成分, 计算各主成分的得分和贡献率, 计算方法如公式 (6):

$$PC_{ik} = \sum_{j=1}^p (Z_{ij} \times V_{jk}) \quad (6)$$

式中: PC_{ik} 为第 i 个样本的第 k 个主成分得分; Z_{ij} 为第 i 个样本的第 j 个指标的标准化值; V_{jk} 为第 j 个指标在第 k 个主成分上的载荷。

根据主成分的贡献率, 加权求和得到土壤肥力

指数(SFI),计算方法如公式(7):

$$SFI_i = \sum_{k=1}^m (PC_{ik} \times \lambda_k) \quad (7)$$

式中: SFI_i 为第*i*个样本的土壤肥力指数; PC_{ik} 为第*i*个样本的第*k*个主成分得分; λ_k 为第*k*个主成分的贡献率。

1.3.3 地理探测器 本文引入地理探测器模型,该模型基于空间异质性理论,适用于分析地理变量的空间分布及其驱动机制,能够有效揭示不同因子对土壤肥力空间格局的解释力及其交互作用。地理探测器包括因子探测、交互探测、风险探测与生态探测四类子模块,用*q*统计量衡量解释变量对响应变量空间分异的贡献^[28],模型的公式如下:

$$q = \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (8)$$

式中: N_h 和*N*分别是*h*层和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别是*h*层和全区沼泽湿地土壤肥力的方差; SSW 和*SST*分别是层内方差之和以及全区总方差。*q*值取值范围为[0,1],值越大表示因子对因变量的空间分异解释力越强。

本研究基于地理探测器中的因子探测与交互探测模块,识别沼泽湿地土壤肥力空间分异的主导因子及其交互机制。考虑模型对分类变量的要求,对连续型因子进行离散化处理:年均降水、海拔、归一化差分植被指数(Normalized difference vegetation index,NDVI)、坡度、地表径流和土壤含水量采用自然断点法分为5类;年均气温、坡向和潜在蒸散发分为6类;人类活动强度分为7类;pH值采用等距分段法划分为5类,以增强变量的区分度与空间可比性。以土壤肥力指数为因变量,选取涵盖气候、地形、植被、水文和人类活动等11项因子为解释变量,开展单因子与双因子交互探测,定量揭示各因子及其交互作用对土壤肥力空间格局的解释力与影响机制。

1.4 数据统计处理

采用Excel进行描述性统计分析;利用ArcGIS 10.8绘制研究区采样点位分布图;环境因子数据集来自中国科学院生态学科数据中心(<https://nesdc.org.cn/>)及国家青藏高原科学数据中心网站(<https://data.tpdc.ac.cn/>);采用改进的内梅罗指数法对不同退化程度沼泽湿地土壤肥力进行评价;利用IBM SPSS Statistics 27进行主成分分析,采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)检验差异显著性,比较高寒沼泽湿地不同退化阶段土壤肥力指标

的差异(Duncan法, $P < 0.05$);利用地理探测器分析环境因子对土壤肥力空间分异的影响程度;使用Origin 2024软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同退化程度土壤肥力指标特征与评价

研究区土壤肥力指标的算术平均值反映了沼泽湿地土壤养分的整体水平(表3)。变异系数(Coefficient of variation,CV)作为衡量土壤特性空间变异的重要指标,反映其异质性及受环境与人为因素影响的程度,为土壤管理和农业决策提供依据^[29-30]。根据CV分级标准,研究区0~30 cm土层中SOM,CEC,TN和TP均表现为强变异($CV > 35\%$),主要受植被类型、水文条件、微生物活性和人为干扰等因素影响,而TK为中等变异($15\% \leq CV \leq 35\%$),其变异性相对较低,可能与其受母质控制及对短期环境变化响应较弱有关^[31-32]。

随着退化程度加剧,SOM,CEC,TN和TP含量整体呈递减趋势。其中,ND的SOM,CEC和TP含量显著高于MD,且在SD与MD之间存在显著差异(图2a,b,d; $P < 0.05$)。TN在ND显著高于SD和MD(图2c; $P < 0.05$)。与上述指标不同,TK在退化梯度上表现出递增趋势,且各退化阶段间差异不显著(图2e)。如图3所示,不同退化阶段中,SOM,CEC,TN和TP均在表层0~10 cm处含量最高,随着土层深度的增加逐渐降低(图3a-d),而TK含量由表层向下呈递增趋势(图3e)。

研究区土壤综合肥力为1.83~2.03,均值为1.91,属于肥沃等级。土壤肥力由高到低为未退化(2.03)>轻度退化(1.87)>中度退化(1.83)(表4)。从土壤分肥力系数(F_i)均值来看,SOM(3)=pH(3)>CEC(2.84)>TP(2.46)>TK(2.26)>TN(1.99),SOM,pH和CEC属于“很肥沃”状态,TP,TK和TN为“肥沃”状态,土壤综合肥力主要的限制因素是TN。

2.2 土壤肥力指标与环境因子的关系

土壤肥力指标与环境因子的相关性分析结果表明(图4),SOM与土壤含水量、年降水量、地上生物量及NDVI显著正相关,TN,CEC与土壤含水量、年降水量及NDVI显著正相关,TP与土壤含水量及AGB显著正相关,TK与NDVI显著正相关,说

表 3 土壤肥力指标统计特征

Table 3 Statistical characteristics of soil fertility indicators

肥力指标 Fertility index	平均值 Average	最大值 Maximum	最小值 Minimum	变异系数 CV Coefficient of variation/%
有机质 SOM/(g·kg ⁻¹)	65.34	95.05	30.26	51.94
阳离子交换量 CEC/(cmol·kg ⁻¹)	21.34	38.87	10.30	35.98
全氮 TN/(g·kg ⁻¹)	2.29	6.09	1.55	80.36
全磷 TP/(g·kg ⁻¹)	2.83	4.79	1.37	79.40
全钾 TK/(g·kg ⁻¹)	20.67	32.87	10.01	34.23

表 4 土壤综合肥力评价

Table 4 Comprehensive soil fertility assessment

退化程度 Degradation degree	分肥力系数(F_i) Fertility partitioning coefficient						综合肥力(F) Comprehensive fertility	肥力等级 Fertility grade
	有机质 SOM	阳离子交换量 CEC	全氮 TN	全磷 TP	全钾 TK	pH 值		
未退化 Not degraded	3	3	2.27	2.62	2.18	3	2.03	肥沃 Fertile
轻度退化 Slightly degraded	3	2.85	1.89	2.42	2.28	3	1.87	肥沃 Fertile
中度退化 Moderately degraded	3	2.66	1.82	2.35	2.32	3	1.83	肥沃 Fertile

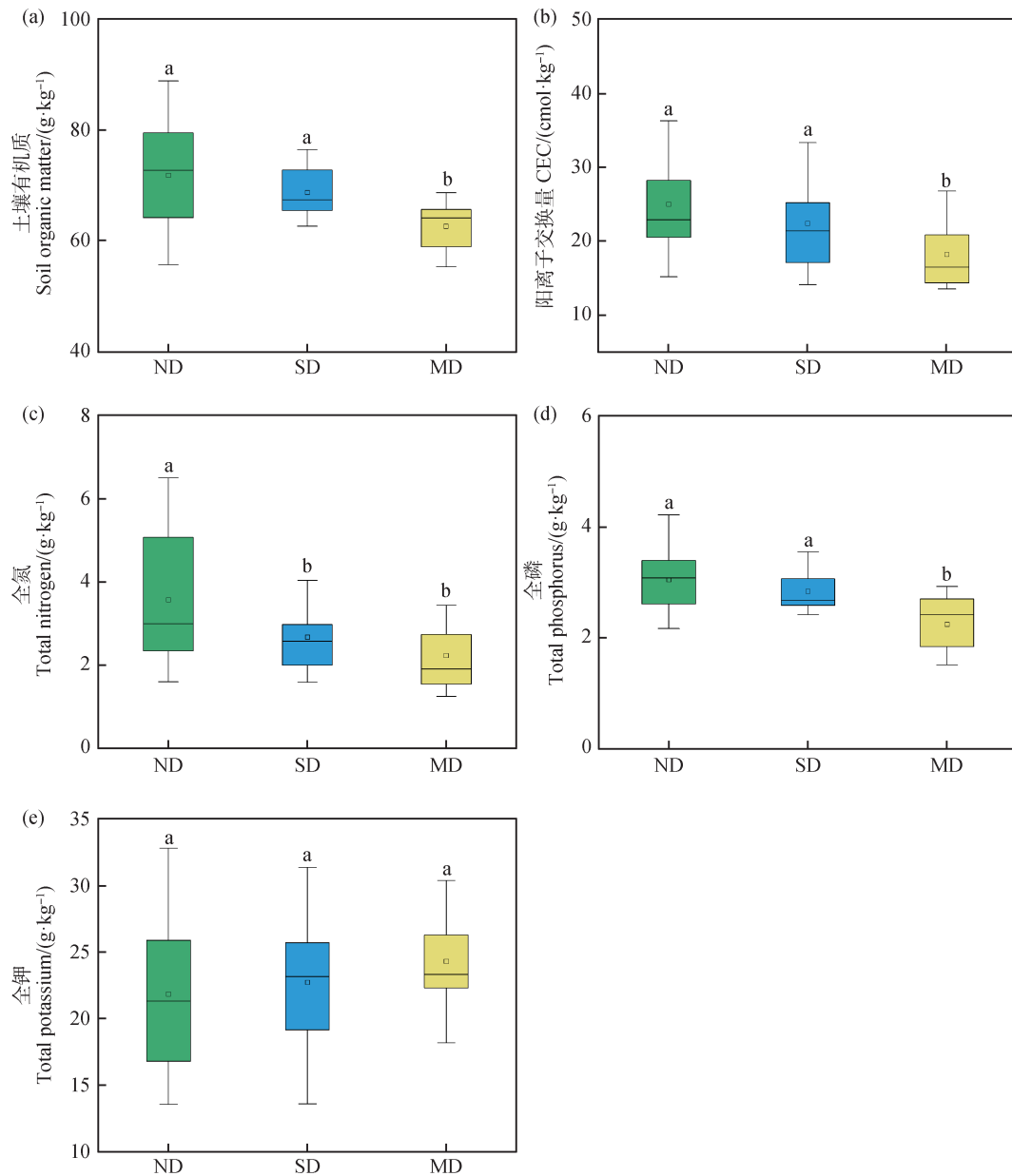


图 2 不同退化程度土壤肥力指标特征

Fig. 2 Characteristics of soil fertility indicators under different degradation degrees

注: ND, 未退化; SD, 轻度退化; MD, 中度退化; 小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平上存在显著差异。下同

Note: ND, not degraded; SD, slightly degraded; MD, moderately degraded. Lowercase letters indicate significant differences at the $P < 0.05$ level. The same as below

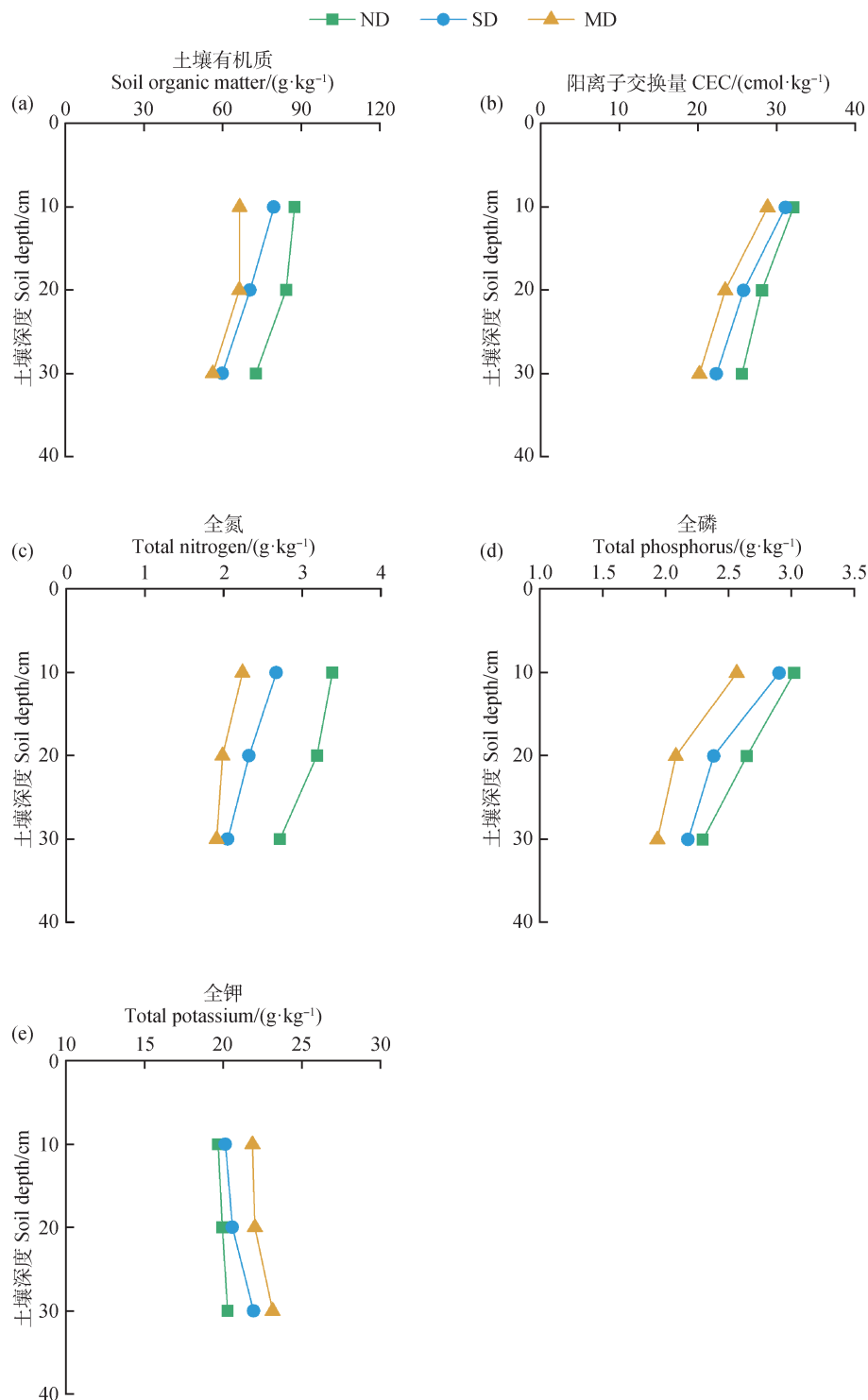


图 3 土壤肥力指标随深度的变化情况

Fig. 3 Changes in soil fertility indicators with depth

明水分状况和植被生产力是影响土壤养分积累的重要因素。同时,这些肥力指标与年均气温、潜在蒸散发及海拔呈负相关关系,表明较高温度和蒸散强度可加速有机质分解和养分流失,不利于土壤养分的积累,而高海拔地区因气候寒冷、生物活性低,进一步限制了土壤肥力的形成与维持^[33-34]。

为明确环境因子对土壤肥力空间分异的影响,本研究采用地理探测器对其空间关系进行定量分析。因子探测结果显示(图 5),年均降水量($q=0.741$)为主导因子,海拔(0.403)与年均气温(0.402)也为显著因子($q>0.4$)。地表径流(0.290)、土壤含水量(0.251)及 NDVI(0.243)具较

强解释力($q>0.2$),而坡向、人类活动强度、潜在蒸散发、坡度和pH的影响相对较弱($q<0.1$)。交互探测结果表明(图6),降水与气温($q=0.897$)、气温与NDVI(0.870)、降水与潜在蒸散发(0.861)组合具有显著协同效应, q 值均高于0.85。多数因子交互作用的解释力超过单因子,表明多因子耦合是驱动土壤肥力空间异质性的机制。

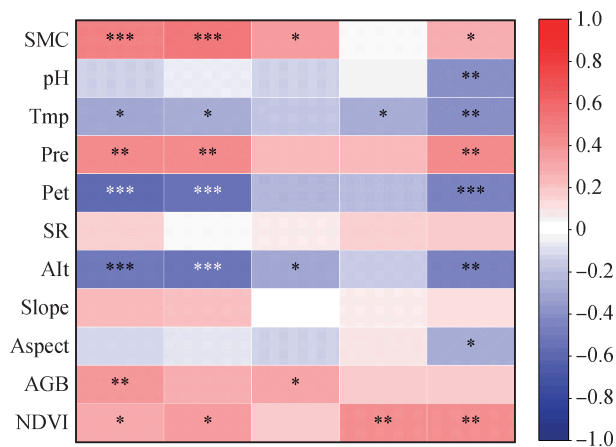


图4 土壤肥力指标与环境因子的相关性

Fig. 4 Correlation between soil fertility indicators and environmental factors

注:Pre, 年均降水量; Tmp, 年均气温; Alt, 海拔; Slope, 坡度; Aspect, 坡向; Pet, 潜在蒸散发; SR, 地表径流; NDVI, 归一化植被指数; HAI, 人类活动强度; SMC, 土壤含水量; pH, 土壤酸碱度; AGB, 地上生物量; * $P<0.05$, ** $P<0.01$, *** $P<0.001$ 。下同

Note: Pre, mean annual precipitation; Tmp, mean annual temperature; Alt, elevation; Slope, slope gradient; Aspect, slope aspect; Pet, potential evapotranspiration; SR, surface runoff; NDVI, normalized difference vegetation index; HAI, human activity intensity; SMC, soil moisture content; pH, soil acidity/alkalinity; AGB, aboveground biomass; * $P<0.05$, ** $P<0.01$, *** $P<0.001$ indicate significance levels. The same as below

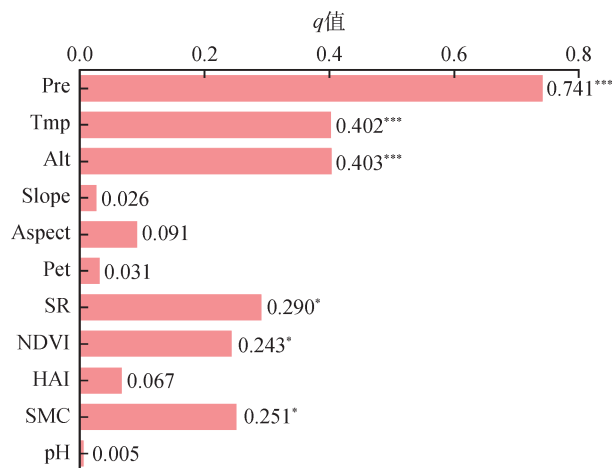


图5 单因子探测对土壤肥力的解释力

Fig. 5 The explanatory power of single-factor detection on soil fertility

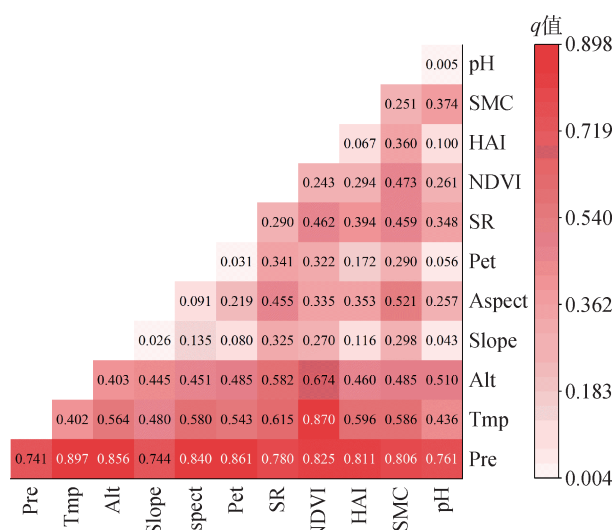


图6 土壤肥力影响因子的交互探测

Fig. 6 Interactive detection of soil fertility influencing factors

3 讨论

3.1 沼泽湿地土壤肥力综合评价

在祁连山国家公园高寒沼泽湿地退化过程中,从原生状态向轻度及中度退化演变,土壤肥力整体仍维持在较高水平。这一现象可能与高寒湿地独特的生态过程与环境条件密切相关。高寒湿地土壤有机质主要来源于多年积累的植物残体和泥炭层,受低温条件影响,微生物分解速率较低,即便在退化初期,土壤碳库释放较为缓慢,养分损耗过程受限,从而延缓了土壤肥力的显著下降^[1]。此外,研究区典型的季节性冻融过程可能通过影响土壤水分迁移和氧化还原状态,调节养分形态及其有效性,进一步维系肥力水平^[35]。在退化过程中,尽管部分湿地水文条件发生改变,但高寒湿地中耐寒性强、适应性高的植物群落仍具有一定的初级生产力,其根系分泌物与凋落物持续向土壤输入碳氮源,在一定程度上对养分输出形成补偿^[36]。同时,中度退化湿地仍保持一定湿润状态,土壤结构相对完整,CEC、含水率等关键理化特性较为稳定,体现出湿地生态系统的生态韧性及自调节能力^[37]。但需引起重视的是,若退化加剧至重度阶段,可能导致土壤有机质加速矿化、植被覆盖率显著下降,最终引发土壤肥力衰退与生态功能退化。因此,在祁连山国家公园的湿地保护与恢复中,应重点关注轻度至中度退化阶段的生态修复,以防止湿地功能发生不可逆的衰退。

研究结果显示,TN的土壤肥力系数均值最

低,仅为1.99,成为土壤综合肥力的主要限制因子,这主要是因为高寒沼泽湿地环境下低温、长期饱和及厌氧条件限制了氮素矿化过程和微生物活性,导致氮素转化效率降低及有机氮释放缓慢。此外,氮素迁移性强,易随径流或淋溶流失,而植物对氮的需求较高^[38-39],综合作用下使TN在土壤养分体系中成为相对短缺、影响整体肥力提升的关键限制因素。

3.2 沼泽湿地土壤肥力指标特征

本研究显示,随着沼泽湿地退化程度的加深,SOM,CEC,TN和TP含量呈下降趋势。相关研究指出,随着沼泽湿地退化,积水量减少,土壤环境由长期厌氧转为好氧,微生物活性增强,促进有机质的分解和矿化,导致SOM含量降低^[40-41]。水分减少直接降低土壤含水量,而腐殖质是CEC的主要来源,SOM的流失会削弱土壤的保水能力和养分吸附能力,使土壤CEC降低。此外,SOM分解释放的氮、磷在好氧条件下更容易通过挥发和植物吸收而流失,导致土壤TN和TP含量减少。植被从适应湿生的沼泽植物向中生或旱生植物转变,生物量、凋落物数量和质量的进一步影响土壤养分循环,加剧了土壤碳、氮、磷的损失^[42-43]。而土壤TK与此相反,可能归因于植被根系活动增强与凋落物分解促进钾元素的累积与富集^[44-45]。

SOM,CEC,TN和TP含量均在土壤表层0~10 cm最高,并随土层深度增加呈递减趋势。这主要源于植物凋落物和根系分泌物在表层不断输入,使有机质大量累积,进而提高SOM,TN和TP含量。同时,丰富的有机质和腐殖质增强了表层土壤的CEC和持水能力。随着土层加深,有机质输入减少,导致养分和水分向下迁移有限,进一步强化了土壤养分的垂直分异,形成明显的表聚分布特征^[46-47]。土壤TK含量随土层深度增加而递增,主要因为钾主要来源于母质矿物风化,深层土壤中矿物质含量较高,且钾迁移性较弱、不易流失,因而在下层土壤中相对丰富^[35]。总体而言,沼泽湿地的演变过程本质上体现了水文、植被与土壤三者之间的耦合互动机制,土壤肥力指标对该过程表现出显著响应,进而影响湿地生态系统的结构与功能。

3.3 土壤肥力空间分异的影响因素

本研究选取11个环境因子对高寒沼泽湿地土

壤肥力空间分异的影响进行探究。因子探测表明,年均降水量在所有环境因子中具有最强的解释力,对土壤肥力的影响贡献达74.1%,表明水分条件是限制土壤肥力的关键因素之一,这与高炜等^[48]研究结果相一致。降水为湿地提供稳定的水源,维持较高的水位,从而减缓水流速度,减少养分流失,使养分更易被植物吸收利用,促进植物生长和有机物的积累,进而提升土壤肥力^[49]。此外,充足的水分有助于土壤颗粒结合,改善土壤结构,增强其保水保肥能力,为土壤养分的持续积累和供给提供了有利条件^[50]。海拔(0.403)和年均气温(0.402)的解释力超过了40%,相关研究表明,温度和海拔不仅影响土壤养分的转化效率,还能调节植物种类组成和分布特征。在研究区的高海拔、低温条件下,有机质分解缓慢,有利于养分的积累与保存,从而提升土壤肥力水平^[47]。地表径流(0.290)、土壤含水量(0.251)和NDVI(0.243)也表现出较强的解释力,说明水文过程与植被状况在维持湿地土壤肥力中同样发挥重要作用^[51]。地表径流可将周边有机质与矿物质输入湿地,增强土壤养分供给,促进植被生长,进而调节土壤养分的循环与动态变化。

交互探测结果显示,降水 $\cap$ 气温($q=0.897$)、气温 $\cap$ NDVI($q=0.870$)和降水 $\cap$ 潜在蒸散发($q=0.861$)的交互作用是决定研究区沼泽湿地土壤肥力空间分异的关键因素。主要原因在于这些因子通过水分调节、热量供给、植被响应和土壤过程等联动机制,系统性地影响土壤有机质积累及养分输入、转化与保持。具体而言,降水与气温共同调控区域的水热平衡,影响植物的生长周期与净初级生产力。在降水充足且气温适宜的条件下,植物生长旺盛,地上与地下生物量显著增加,为土壤输入更多植物残体和根系分泌物,进而提高土壤有机质含量及氮、磷等养分的累积量^[5]。气温与NDVI的协同效应则体现出气候条件对植被覆盖度和生物活性的调控。NDVI作为表征植被生长状况的重要指标,其增强通常伴随着光合作用的增强和生物量积累的增加,意味着更多碳源输入土壤系统,有助于腐殖质形成和阳离子交换量的提升,同时加速氮矿化与磷转化过程^[52]。此外,降水与潜在蒸散发的交互反映了水分输入与大气蒸发需求之间的动态平衡状态,直接影响土壤水分的稳定性与可利用性。适宜的水热条件有利于泥炭层发育与养分保持,增强土壤肥力,而水热失衡则可能引发养分流失,削弱肥力水平。

4 结论

(1)青海祁连山国家公园高寒沼泽湿地整体处于较高肥力水平,但随退化加剧,土壤综合肥力逐渐下降,TN为主要限制因子。

(2)沿退化序列,SOM,CEC,TN和TP含量逐渐减少,而TK呈上升趋势,反映出退化过程中土壤养分流失与结构退化并存的特征。垂直剖面上,除TK外,其余肥力指标随深度增加而降低,表明肥力集中于表层土壤。

(3)气候因子是土壤肥力空间分异的主导因素,其中年均降水、气温及海拔影响显著。气候与植被因子间存在显著协同效应,说明气候变化通过调控植被特征对土壤肥力格局产生关键影响。

参考文献

- [1] 孙欢,曹永强,陈江枚,等. 若尔盖典型高寒湿地碳库特征及其影响因素[J]. 国家公园(中英文),2025,3(3):141-153
SUN H, CAO Y Q, CHEN J M, et al. Carbon storage characteristics and influencing factors of typical alpine wetlands in Zoige[J]. National Park, 2025, 3(3):141-153
- [2] 侯蒙京,高金龙,葛静,等. 青藏高原东部高寒沼泽湿地动态变化及其驱动因素研究[J]. 草业学报,2020,29(1):13-27
HOU M J, GAO J L, GE J, et al. An analysis of dynamic changes and their driving factors in marsh wetlands in the eastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(1):13-27
- [3] 唐仕芳,苟小林,补春兰,等. 青藏高原典型高寒退化湿地与草甸土壤有机碳现状研究[J]. 安徽农业科学,2025,53(3):70-76
TANG S F, GOU X L, BU C L, et al. Research of soil organic carbon state in typical alpine-cold degraded wetland and meadow of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2025, 53(3):70-76
- [4] 李伟,杨岷园,熊健,等. 西藏雅尼湿地土壤养分空间变异特征及肥力评价[J]. 冰川冻土,2025,47(2):549-561
LI W, YANG J Y, XIONG J, et al. Spatial variation of soil nutrients and fertility evaluation in Yani Wetland, Xizang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2025, 47(2):549-561
- [5] 张倚浩,阎建忠,程先. 气候变化与人类活动对青藏高原湿地的影响研究进展[J]. 生态学报,2023,43(6):2180-2193
ZHANG Y H, YAN J Z, CHENG X. Advances in impact of climate change and human activities on wetlands on the Tibetan Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(6):2180-2193
- [6] 周华坤,肖锋,周秉荣,等. 青海省湿地资源现状、问题和保护策略[J]. 青海科技,2021,28(2):21-26
ZHOU H K, XIAO F, ZHOU B R, et al. Present situation, problems and protection strategies of wetland resources in Qinghai Province[J]. Qinghai Science and Technology, 2021, 28(2):21-26
- [7] 赵志刚,史小明. 青藏高原高寒湿地生态系统演变、修复与保护[J]. 科技导报,2020,38(17):33-41
ZHAO Z G, SHI X M. Ecosystem evolution of alpine wetland in Tibetan Plateau and consideration for ecological restoration and conservation[J]. Science & Technology Review, 2020, 38(17):33-41
- [8] JENNY H. Factors of soil formation: a system of quantitative pedology [M]. New York: McGraw-Hill, 1941:1-12
- [9] JIP H, SU R, WU G D, et al. Projecting future wetland dynamics under climate change and land use pressure: a machine learning approach using remote sensing and Markov chain modeling[J]. Remote Sensing, 2025, 17(6):1089
- [10] SALIMI S, ALMUKTAR S A A N, SCHOLZ M. Impact of climate change on wetland ecosystems: A critical review of experimental wetlands[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 286:112160
- [11] XIA S P, SONG Z L, YU B B, et al. Land use changes and edaphic properties control contents and isotopic compositions of soil organic carbon and nitrogen in wetlands[J]. Catena, 2024, 241:108031
- [12] TAN L S, GE Z M, JI Y H, et al. Land use and land cover changes in coastal and inland wetlands cause soil carbon and nitrogen loss[J]. Global Ecology and Biogeography, 2022, 31(12):2541-2563
- [13] 周楠,王蕾,毛旭烽,等. 青海祁连山国家公园退化高寒沼泽湿地植物群落和土壤特征及其关系研究[J]. 草地学报,2025,33(4):1114-1126
ZHOU N, WANG L, MAO X F, et al. Characteristics of plant community and soil and their relationship research in degraded alpine marsh wetlands in Qinghai Qilian Mountain National Park[J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(4):1114-1126
- [14] 陈倩. 祁连山国家公园植物和土壤微生物多样性及群落构建机制[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2023:83-94
CHEN Q. Diversity and community assembly mechanisms of plant and soil microbial in Qilian Mountain National Park [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2023:83-94
- [15] 陈豪,丁文广, Tanja Binte Zafar. 基于USLE模型的祁连山国家公园土壤水力侵蚀评价[J]. 中国水土保持科学,2020,18(4):38-44
CHEN H, DING W G, ZAFAR T. Evaluation of soil water erosion in Qilian Mountain National Park based on USLE model[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(4):38-44
- [16] 熊健,赵茜茜,李伟,等. 拉萨河下游湿地土壤养分特征与肥力评价[J]. 水土保持学报,2024,38(1):328-336
XIONG J, ZHAO X R, LI W, et al. Soil nutrient characteristics and fertility evaluation of wetland in the lower reaches of the Lhasa River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(1):328-336
- [17] 虞泊楠,陈虎林,杨洋,等. 西藏麦地卡湿地国家级自然保护区土壤肥力评价[J]. 水土保持学报,2022,36(5):287-295
TUO B N, CHEN H L, YANG Y, et al. Evaluation of soil fertil-

- ity in the mitika wetland national nature reserve, Tibet, China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(5): 287-295
- [18] 高浩然, 周勇, 刘甲康, 等. 湖北省两种地形区耕地土壤肥力指标空间格局与主控因素[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 283-292
- GAO H R, ZHOU Y, LIU J K, et al. Spatial patterns and main control factors of soil fertility indicators in arable land in two topographic regions of Hubei Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 283-292
- [19] 王翔宇, 张学霞, 胡韵哲, 等. 基于地理探测器的耕地土壤肥力及影响因子[J]. 环境科学, 2024, 45(12): 7378-7389
- WANG X Y, ZHANG X X, HU Y Z, et al. Soil fertility and influencing factors of cultivated land based on the geodetector[J]. Environmental Science, 2024, 45(12): 7378-7389
- [20] 赵帅, 杨文权, 蒯宝珺, 等. 祁连山国家公园不同退化高寒草甸植物与土壤特性研究[J]. 草地学报, 2023, 31(5): 1530-1538
- ZHAO S, YANG W Q, LIN B J, et al. Plant and soil characteristics of different degraded alpine meadows in Qilian Mountain National Park[J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(5): 1530-1538
- [21] 李玉辰, 李宗省, 张小平, 等. 祁连山国家公园植被时空变化及其对人类活动的响应[J]. 生态学报, 2023, 43(1): 219-233
- LI Y C, LI Z X, ZHANG X P, et al. Spatial and temporal changes in vegetation cover and response to human activities in Qilian Mountain National Park[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(1): 219-233
- [22] 青海省气象局. DB63/T 1794—2020 青海省高寒沼泽湿地退化等级划分标准[S]. 西宁: 中国标准出版社, 2020: 1-5
- Qinghai Provincial Meteorological Bureau. DB63/T 1794—2020 Classification Standard for Degradation Grades of Alpine Marsh Wetlands in Qinghai Province [S]. Xining: China Standards Press, 2020: 1-5
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-114
- BAO S D. Soil agrochemical analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 25-114
- [24] 阚文杰, 吴启堂. 一个定量综合评价土壤肥力的方法初探[J]. 土壤通报, 1994, 25(6): 245-247
- KAN W J, WU Q T. Preliminary study on a quantitative and comprehensive evaluation method of soil fertility [J]. Chinese Journal of Soil Science, 1994, 25(6): 245-247
- [25] 许咏梅, 周黎明, 张兆彤. 新疆昌吉州耕地开垦轨迹对土壤肥力变化的影响[J]. 地理研究, 2021, 40(3): 657-672
- XU Y M, ZHOU L M, ZHANG Z T. Effect of cultivated land reclamation tracks on soil fertility changes in Changji Prefecture, Xinjiang [J]. Geographical Research, 2021, 40(3): 657-672
- [26] 耿荣, 王明国, 尹学红, 等. 基于主成分分析法的中宁县农田土壤肥力评价[J]. 农业科学研究, 2021, 42(1): 1-7
- GENG R, WANG M G, YIN X H, et al. Evaluation of soil fertility of farmland based on principal component analysis in Zhongning county [J]. Journal of Agricultural Sciences, 2021, 42(1): 1-7
- [27] 张水清, 黄绍敏, 郭斗斗, 等. 基于主成分分析法的土壤肥力评价[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(2): 1096-1097, 1165
- ZHANG S Q, HUANG S M, GUO D D, et al. Evaluation on soil fertility quality based on principal component analysis [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(2): 1096-1097, 1165
- [28] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134
- WANG J F, XU C D. Geodetector: principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134
- [29] 张灵柯, 高俊琴, 李谦维, 等. 鄱阳湖湿地土壤碳氮磷化学计量空间分布特征[J]. 生态与农村环境学报, 2024, 40(6): 815-823
- ZHANG L K, GAO J Q, LI Q W, et al. Characteristics of spatial distribution of soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry in the wetland of Poyang Lake, China [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2024, 40(6): 815-823
- [30] 赵海燕, 张剑, 刘冬, 等. 不同沼泽湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2020, 37(3): 618-626
- ZHAO H Y, ZHANG J, LIU D, et al. Characteristics and determining factors for ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in different marsh wetlands [J]. Arid Zone Research, 2020, 37(3): 618-626
- [31] 王红, 邵京, 吴雨, 等. 新济洲国家湿地公园土壤养分特征及其肥力评价[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(8): 68-72, 96
- WANG H, SHAO J, WU Y, et al. Nutrient characteristics and fertility evaluation of soil in Xinjizhou national wetland park [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2022, 50(8): 68-72, 96
- [32] 刘晓娟, 张玉斌, 王煜明, 等. 甘肃盐池湾国家级自然保护区沼泽湿地的土壤特性[J]. 水土保持通报, 2021, 41(4): 106-112
- LIU X J, ZHANG Y B, WANG Y M, et al. Soil characteristics of swamp wetland in Yanchiwan national nature reserve of Gansu Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(4): 106-112
- [33] 汪昱言, 马红梅, 董石, 等. 麦地卡高寒湿地典型生态系统类型季节性土壤肥力指标及土壤化学计量特征[J]. 应用与环境生物学报, 2025, 31(3): 497-508
- WANG Y Y, MA H M, DONG S, et al. Seasonal soil fertility indicators and soil stoichiometric characteristics of typical wetland ecosystem types in the Mitika alpine wetland [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2025, 31(3): 497-508
- [34] 王传盈, 王凯月, 王浩然, 等. 黄河下游典型湿地土壤养分及其生态化学计量特征[J]. 环境科学, 2024, 45(3): 1674-1683
- WANG C Y, WANG K Y, WANG H R, et al. Nutrients and ecological stoichiometry characteristics of typical wetland soils in the lower Yellow River [J]. Environmental Science, 2024, 45(3): 1674-1683
- [35] 王蕾. 青海祁连山沼泽湿地格局-特征-功能耦合关系研究[D]. 西宁: 青海师范大学, 2024: 73-91
- WANG L. Coupling relationship of marsh wetlandspatterns-characteristics-functions in the Qilian Mountains of Qinghai,

- China[D]. Xining: Qinghai Normal University, 2024: 73-91
- [36] 余延娣, 杨晓渊, 马丽, 等. 退化高寒草甸植物群落和土壤特征及其相互关系研究[J]. 草地学报, 2021, 29(S1): 62-71
SHE Y D, YANG X Y, MA L, et al. Study on relationship between plant community degradation and soil environment in an alpine meadow [J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29 (S1): 62-71
- [37] 宋娟, 柴瑜, 徐文印, 等. 黄河源区高寒湿地土壤团聚体有机碳矿化特征及其温度敏感性[J]. 草地学报, 2024, 32(7): 2205-2213
SONG X, CHAI Y, XU W Y, et al. Characteristics of organic carbon mineralization and their temperature sensitivity within soil aggregate in alpine wetlands in source region of Yellow River[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(7): 2205-2213
- [38] 林春英, 李希来, 李红梅, 等. 不同退化高寒沼泽湿地土壤碳氮和贮量分布特征[J]. 草地学报, 2019, 27(4): 805-816
LIN C Y, LI X L, LI H M, et al. Distribution and storage of soil organic carbon and nitrogen in alpine wetland under different degradation succession [J]. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27 (4): 805-816
- [39] 王千月. 玛曲退化高寒湿地植物-土壤-微生物碳氮磷分布特征研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2024: 24-33
WANG Q Y. Characterization of plant-soil-microbial carbon, nitrogen and phosphorus distribution in degraded alpine wetlands in Maqu [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2024: 24-33
- [40] 聂秀青, 王冬, 周国英, 等. 三江源地区高寒湿地土壤微生物群落特征[J]. 土壤通报, 2023, 54(6): 1401-1408
NIE X Q, WANG D, ZHOU G Y, et al. Characteristics of soil microbial community structure in three rivers source regions alpine wetlands [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54 (6): 1401-1408
- [41] 林春英, 李希来, 张玉欣, 等. 黄河源区高寒沼泽湿地土壤微生物群落结构对不同退化的响应[J]. 环境科学, 2021, 42(8): 3971-3984
LIN C Y, LI X L, ZHANG Y X, et al. Responses of different degradation stages of alpine wetland on soil microbial community in the Yellow River source zone [J]. Environmental Science, 2021, 42(8): 3971-3984
- [42] 邵非凡, 陈禹含, 崔圆, 等. 北方典型沼泽湿地高低土壤水分下植物群落特征[J]. 生态学报, 2023, 43(21): 8692-8703
SHAO F F, CHEN Y H, CUI Y, et al. Plant community characteristics under low and high soil moisture conditions in typical marsh wetlands in northern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(21): 8692-8703
- [43] 石明明, 周秉荣, 多杰卓么, 等. 三江源区沼泽湿地退化过程中植被变化特征及评价指标体系[J]. 西北植物学报, 2020, 40(10): 1751-1758
SHI M M, ZHOU B R, DUO J, et al. Characteristics of vegetation and its evaluation index system in the swamp degradation process over three-river resource region [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2020, 40(10): 1751-1758
- [44] 王梦梦, 张丽华, 当知才让, 等. 高寒湿地退化对植物群落特征与土壤特性的影响[J]. 生态学报, 2023, 43(19): 7910-7923
WANG M M, ZHANG L H, DANG Z, et al. Effects of alpine wetland degradation on plant community characteristics and soil properties [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(19): 7910-7923
- [45] 王婷, 张永超, 赵之重. 青藏高原退化高寒湿地植被群落结构和土壤养分变化特征[J]. 草业学报, 2020, 29(4): 9-18
WANG T, ZHANG Y C, ZHAO Z Z. Characteristics of the vegetation community and soil nutrient status in a degraded alpine wetland of Qinghai-Tibet Plateau [J]. Acta Pratacul-turae Sinica, 2020, 29(4): 9-18
- [46] SPIELES D J. Wetland construction, restoration, and integration: a comparative review [J]. Land, 2022, 11(4): 554
- [47] 王梦梦. 黄河首曲高寒湿地生态退化研究及恢复对策[D]. 兰州: 西北师范大学, 2023: 38-57
WANG M M. Ecological degradation of alpine wetland in the first meander of Yellow River and its restoration countermeasures [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2023: 38-57
- [48] 高伟, 杜以鑫, 朱丹瑶, 等. 小兴安岭沼泽湿地时空演变特征及其驱动机制[J]. 生态学报, 2024, 44(22): 10271-10286
GAO W, DU Y X, ZHU D Y, et al. Spatio-temporal evolution characteristics and driving mechanism of wetlands in Xiaoxing'an Mountains [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(22): 10271-10286
- [49] 张晓雅. 降水变化对若尔盖高寒湿地生态系统关键碳过程的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2022: 26-53
ZHANG X Y. Effect of precipitation change on the key carbon process in the Zoigê alpine wetlands [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2022: 26-53
- [50] 宋小艳, 王长庭, 胡雷, 等. 若尔盖退化高寒草甸土壤团聚体结合有机碳的变化[J]. 生态学报, 2022, 42(4): 1538-1548
SONG X Y, WANG C T, HU L, et al. Changes in soil aggregate-associated organic carbon of degraded alpine meadow in the Zoigê Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42 (4): 1538-1548
- [51] 胡凤烨, 赵锐锋, 张丽华, 等. 黄河首曲湿地植物群落生产力、物种多样性及其与生境的关系[J]. 生态学报, 2023, 43(24): 10238-10249
HU F Y, ZHAO R F, ZHANG L H, et al. Productivity and species diversity of plant communities and their relationship with habitats in the wetland of first meander of Yellow River [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(24): 10238-10249
- [52] 神祥金, 张佳琦, 吕宪国. 青藏高原沼泽湿地植被NDVI时空变化及其对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2020, 40(18): 6259-6268
SHEN X J, ZHANG J Q, LÜ X G. Spatio-temporal change of marshes NDVI and its response to climate change in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6259-6268

(责任编辑 闵芝智)