

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.01.001

熊健, 赵茜芮, 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 Jian, ZHAO Xirui, LI Wei, et al. Soil nutrient characteristics and fertility evaluation of wetland in the lower reaches of Lhasa river[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(1): 328-336.

拉萨河下游湿地土壤养分特征与肥力评价

熊健¹, 赵茜芮¹, 李伟¹, 杨博¹, 孙晶¹, 杨崛园¹, 张强英¹, 吕学斌^{1,2}

(1. 青藏高原生物多样性与生态环境保护教育部重点实验室, 西藏大学生态环境学院,

拉萨 850000; 2. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300350)

摘要: [目的] 为探索拉萨河下游湿地土壤的养分特征和肥力状况。[方法] 选取甘曲湿地、巴嘎雪湿地、拉鲁湿地和茶巴朗湿地 4 个代表性区域的土壤为研究对象, 共采集 69 份土壤样本, 测定样品的 pH、总氮(TN)、总磷(TP)、总钾(TK)、全盐、电导率、氧化还原电位(redox potential)、阳离子交换量(CEC)和有机质(OM)值, 并利用改进内梅罗综合指数法对湿地土壤肥力进行全面的评价。[结果] (1) 研究区土壤的 pH 范围为 5.77~7.78, 均值为 6.62, 呈中性; 有机质和总氮的相关性强, 分布特征相似, 含量分别为 61.82, 3.13 g/kg, 均为很丰富的状态, 属于一级水平; 总磷和总钾含量分别为 0.75, 18.05 g/kg, 为适中的状态, 属于三级水平; 全盐含量为 0.92 g/kg, 电导率为 2.97 mS/m, 整体来看, 研究区土壤具有较强的保肥能力。(2) 湿地土壤综合肥力系数(P)顺序为茶巴朗湿地(2.01) > 巴嘎雪湿地(1.95) > 拉鲁湿地(1.93) > 甘曲湿地(1.86), 均属于肥沃等级, 影响湿地土壤综合肥力的指标是总钾, 因各自然湿地形成条件相似, 土壤综合肥力系数无显著差异。[结论] 研究结果明晰了拉萨河下游湿地土壤养分现状, 为实现研究区湿地资源的可持续利用提供科学依据。

关键词: 拉萨河; 湿地; 养分特征; 肥力评价

中图分类号: X825; S158.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)01-0328-09

Soil Nutrient Characteristics and Fertility Evaluation of Wetland in the Lower Reaches of the Lhasa River

XIONG Jian¹, ZHAO Xirui¹, LI Wei¹, YANG Bo¹,

SUN Jing¹, YANG Jueyuan¹, ZHANG Qiangying¹, LÜ Xuebin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Biodiversity and Eco-environmental Protection of the

Qinghai-Tibetan Plateau (Ministry of Education), School of Ecology and Environment, Tibet University, Lhasa

850000, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: [Objective] To explore the nutrient characteristics and fertility status of wetland soil in the lower reaches of Lhasa River. [Methods] A total of 69 soil samples were collected from the four representative regions of Ganqu Wetland, Baga Snow Wetland, Lalu Wetland and Chabalang wetland. The values of pH, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, total salt, electrical conductivity, redox potential, cation exchange capacity and organic matter of the samples were determined. The improved Nemerow composite index method was used to evaluate the wetland soil fertility comprehensively. [Results] (1) The pH range of the soil in the study area was 5.77~7.78, with an average value of 6.62, which was neutral. The correlation between organic matter and total nitrogen was strong, and the distribution characteristics were similar. The contents of organic matter and total nitrogen were 61.82 and 3.13 g/kg, respectively, and both were very abundant, belonging to the first level. The contents of total phosphorus and total potassium were 0.75 g/kg

收稿日期: 2023-04-12

修回日期: 2023-05-19

录用日期: 2023-05-23

网络首发日期 (www.cnki.net): 2023-09-14

资助项目: 西藏自治区科技计划项目 (XZ202101ZD14G, XZ202202YD0027C, XZ202101ZY0012G); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目 (2019QZKK0603); 国家重点研发计划“固废资源化”重点专项 (2019YFC1904100); 中央支持地方高校专项 (藏财预指〔2021〕01, 〔2022〕01, 〔2023〕01); 西藏大学人才发展激励计划—青年学者项目。

第一作者: 熊健 (1987—), 女, 博士, 副教授, 主要从事森林生态研究。E-mail: 568284825@qq.com

通信作者: 李伟 (1986—), 男, 博士, 副教授, 主要从事土壤化学研究。E-mail: li_wei05416@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

and 18.05 g/kg, respectively, which were moderate and belonged to the tertiary level. The total salt content is 0.92 g/kg, and the electrical conductivity is 2.97 mS/m. On the whole, the soil in the study area had strong fertilizer retention ability. (2) The soil comprehensive fertility coefficient (P) of wetland was in the order of Chabalong Wetland (2.01) > Bagaoxue Wetland (1.95) > Lalu Wetland (1.93) > Ganqu Wetland (1.86), all belonging to the fertility level. The index affecting the soil comprehensive fertility of wetland was TP, because the formation conditions of natural wetlands were similar. There was no significant difference in soil comprehensive fertility coefficient. [Conclusion] The present situation of wetland soil nutrients in the lower Lhasa River was clarified, which provides scientific basis for realizing the sustainable utilization of wetland resources in the the study area.

Keywords: Lhasa River; wetland; nutrient characteristics; fertility evaluation

Received: 2023-04-12

Revised: 2023-05-19

Accepted: 2023-05-23

Online(www.cnki.net): 2023-09-14

湿地生态系统资源丰富,是碳、氮、磷和钾等营养元素的“源和汇”,其含量与湿地土壤肥力有直接关系。土壤肥力是指土壤供给植物所必需养分的能力以及与养分供给能力有关的各种土壤性质与状态,是土壤物理、化学和生物等性质的综合体现,能直接或间接影响湿地植被生长状态^[1-3]。西藏分布着众多天然湿地,因复杂多变的自然环境使得湿地生态系统极为脆弱。拉萨河是湿地主要聚集区之一,由于人类活动范围的扩大,对湿地造成一定的影响,为保障该区域内湿地生态系统可持续发展,针对湿地土壤肥力质量状况的研究有着十分积极意义。

近年来西藏地区的土壤肥力相关研究较少,总体看来,西藏土壤具有土层薄、砂砾多、蒸发量大、保水能力弱、营养含量低等特点。拉萨河下游是西藏人口流量最大、分布最广、农牧业和旅游业最发达的区域^[4-6],人类活动直接或间接影响该区域湿地的生态环境。研究以湿地土壤养分特征为切入点,选择拉萨河下游代表性湿地:甘曲湿地、巴嘎雪湿地、拉鲁湿地和茶巴朗湿地土壤为研究对象,共采集 69 份土壤样本,测定分析土壤样品的 pH、总氮、总磷、总钾、全盐、电导率、氧化还原电位、阳离子交换量和有机质,结合单因子肥力评价法和改进内梅罗综合指数法对研究区土壤肥力进行全面评价,以期了解拉萨河下游湿地土壤养分特征与肥力综合现状,补充此方面的基础研究数据,为湿地可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

拉萨河(90°05'00"—93°20'00"E, 29°20'00"—31°15'00"N)是雅鲁藏布江五大支流之一,位于青藏高原中南部,源于念青唐古拉山中部,流经墨竹工卡县、林周县、达孜区和拉萨市等。拉萨河自东北向西南延伸,长度为 568 km,流域面积为 31 760 km²,平均海拔

为 5 200 m^[7],其东以帕隆藏布和尼洋河为界,南以雅鲁藏布江干流流域为界,西以藏北内陆水系为界,北以怒江为界^[8]。拉萨河流域分布着众多湿地,它们既是世界上重要的生物多样性宝库,又是生态安全屏障,同时还具有重要的经济价值和社会价值。拉萨河流域的生态环境状况直接关系到广大人民群众生产生活及国家能源安全等一系列问题。且随着气候变化的加剧和人类活动的影响,湿地退化现象日益严重,湿地脆弱性日渐明显。因此,研究拉萨河流域的环境与可持续发展显得尤为重要,为保护湿地生态系统,本研究对拉萨河下游湿地表层土壤进行肥力评估。

(1)甘曲湿地。甘曲湿地位于林周县甘曲镇(91°15'57"—91°17'40"E, 29°53'18"—29°54'27"N),属于草甸沼泽湿地^[9]。甘曲湿地分布在雅鲁藏布江上游河谷地带,是拉萨河流域重要湿地之一,不仅在国家级湿地保护区中占有举足轻重的地位,同时又是我国生物多样性保护和生态系统服务功能研究最理想的基地,具有较高的科学研究价值和巨大的旅游开发潜力。该区域为典型高寒草甸草原和高山灌丛草场过渡地区,具有独特的气候,适宜发展畜牧业。近年来,湿地周围因受经济活动增强和频繁的人为活动影响,导致湿地环境发生较大的变化。

(2)巴嘎雪湿地。巴嘎雪湿地处拉萨市达孜区塔杰乡巴嘎雪村,东与 318 国道相接,西濒拉萨河,地理位置为 91°25'40"E—91°25'59"E, 29°42'06"N—29°42'40"N,湿地面积约为 0.44 km²,属于草本沼泽湿地,是拉萨河流域代表性湿地之一。该湿地为雅鲁藏布中河谷黑颈鹤国家湿地自然保护区重要组成部分,湿地水资源丰富,植被茂密,在饮水与生态环境调节等方面具有重要作用。但由于受人类活动影响较大,造成湿地生物多样性减少及环境恶化等问题^[10],因此对其进行合理的保护显得尤为重要。

(3)拉鲁湿地。拉鲁湿地处拉萨市西北部,呈东

西带状分布,位于 $91^{\circ}03'41''$ — $91^{\circ}06'48''$ E, $29^{\circ}39'25''$ — $29^{\circ}42'08''$ N,总面积约 12.20 km^2 ,是我国目前海拔最高、面积最大的城市湿地,具有丰富的生物资源^[11]。拉鲁湿地发挥的主要作用是调控气候、吸尘防沙、补充氧气、保持生态平衡、改善城市环境质量,从而更好地促进拉萨市城市生态系统良性循环。

(4)茶巴朗湿地。茶巴朗湿地处拉萨市曲水县茶巴朗村,其东侧靠近乡道,沿拉萨河右岸呈带状分布,其间有水渠与拉萨河相通,是拉萨河流域的主要湿地之一。其地理坐标为 $90^{\circ}49'20''$ — $90^{\circ}50'30''$ E, $29^{\circ}22'30''$ — $29^{\circ}22'59''$ N,平均海拔为 $3\ 600 \text{ m}$,总面积为 0.20 km^2 ,属于草本沼泽湿地^[12]。

1.2 土壤样品采集与处理

采样时间为 2021 年 5—6 月。通过对甘曲湿地、巴

嘎雪湿地、拉鲁湿地和茶巴朗湿地进行实地考察,针对其水文特点、地形及布点的实际难易程度共布设 69 个采样点(甘曲湿地 22 个,拉鲁湿地 17 个,巴嘎雪湿地 11 个,茶巴朗湿地 19 个),具体采样点见图 1。采样方法是沿湿地内水系分布,采用随机布点法进行样点布设,在水系主干道进行等距离布点。用便携式 GPS 对样品点进行定位,清除土壤表层残渣等,采用 5 点采样混合法,在样品点 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 范围内采集 3~5 份约 1.5 kg 的表层 0—30 cm 土壤样品,装入聚乙烯密封袋中,低温运至实验室待检测,并详细记录采样点基本环境信息。样品经过自然风干、去除杂质、研磨,过 10 目筛,在定性滤纸使用四分法处理样品后,取 1 份用于湿地土壤理化性质的检测,剩下样品保存备用。

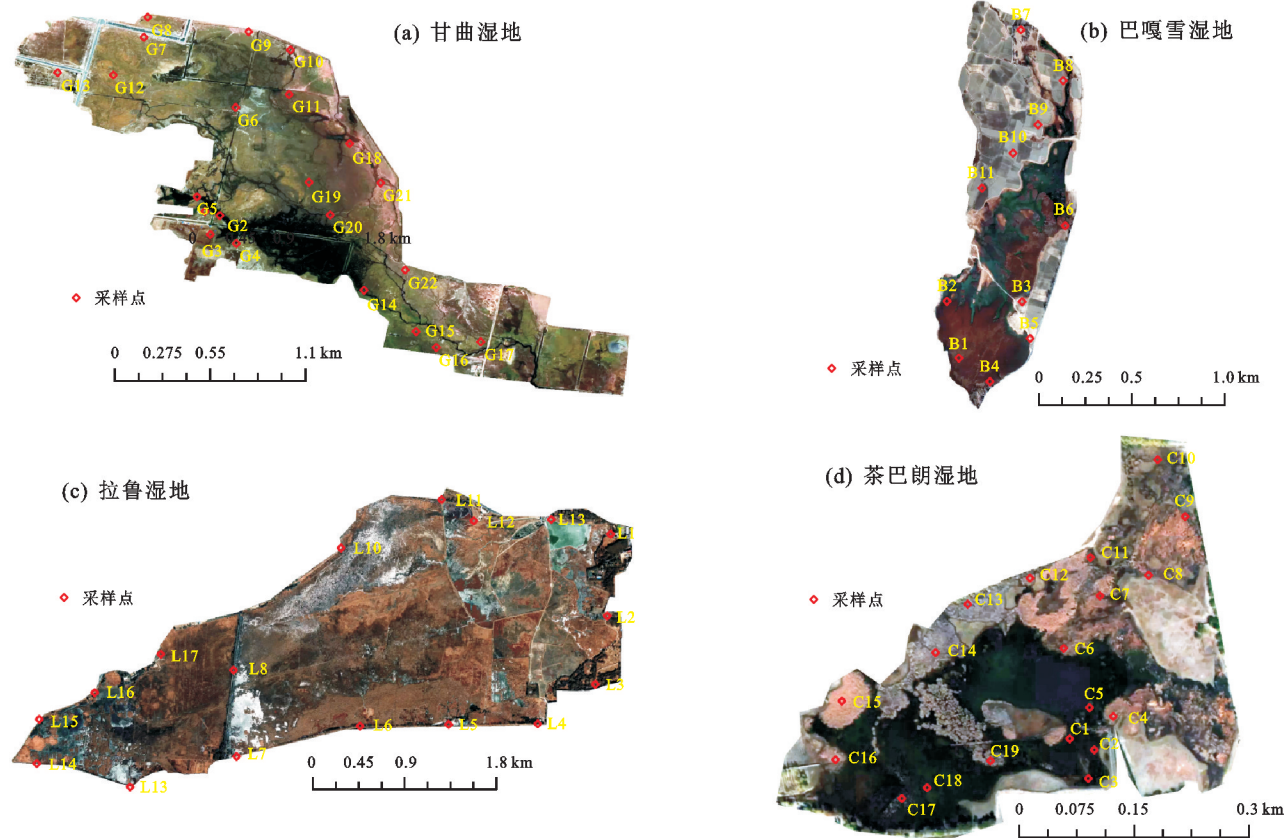


图 1 湿地土壤采样点分布

Fig. 1 Distribution map of wetland sampling points

1.3 样品分析

本研究检测湿地土壤的理化性质,包括 pH、有机质、电导率、阳离子交换量、总氮、总磷、总钾、全盐和氧化还原电位。各指标的测量方法和测量依据参考《土壤农化分析》^[13]。

1.4 土壤质量评价方法

(1)土壤单因子肥力评价方法与标准。本研究参照全国第二次土壤普查及有关标准^[14](表 1)对拉萨河下游湿地表层土壤中的养分指标和理化性质分别

进行评价,其中 pH 指标依据为:pH<4.5 为强酸性,4.5~5.5 为酸性,5.5~6.5 为弱酸性,6.5~7.5 为中性,7.5~8.5 为弱碱性,8.5 以上为碱性^[15]。

(2)土壤综合肥力质量评价方法。改进内梅罗综合指数法能较全面、简单地量化土壤肥力等级,是常用于土壤肥力的评价方法。在进行内梅罗综合评价前,需要根据相应的分级标准对所选择的参评指标进行标准化以消除各肥力属性之间的量纲差别。本研究参照第二次土壤普查^[14]中的土壤各属性分级标

准(表 2),标准化处理的方法中, P_i 为属性分系数, C_i 为该属性测定值^[3,15-16]。

表 1 土壤养分分级标准

Table 1 Soil nutrient classification criteria g/kg				
等级	有机质	总氮	总磷	总钾
很丰富(1)	>40	>2	>1	>25
丰富(2)	30~40	1.5~2	0.8~1	20~25
适中(3)	20~30	1~1.5	0.6~0.8	15~20
缺乏(4)	10~20	0.75~1	0.4~0.6	10~15
很缺乏(5)	6~10	0.5~0.75	0.2~0.4	5~10
极缺乏(6)	<6	<0.5	<0.2	<5

①当属性值属于差的一级,即 $C_i \leq X_a$ 时, $P_i = \frac{C_i}{X_a}$ ($P_i \leq 1$);

②当属性值属于中等一级,即 $X_a < C_i \leq X_b$ 时, $P_i = 1 + \frac{C_i - X_a}{X_b - X_a}$ ($1 < P_i \leq 2$);

③当属性值属于较好一级,即 $X_b < C_i \leq X_c$ 时, $P_i = 2 + \frac{C_i - X_b}{X_c - X_b}$ ($2 < P_i \leq 3$);

④当属性值属于好的一级,即 $C_i > X_c$ 时, $P_i = 3$ 。

表 2 土壤各属性分级标准

Table 2 Grading criteria for each soil property			
土壤属性	X_a	X_b	X_c
有机质/(g·kg ⁻¹)	10	20	30
阳离子交换量/(cmol·kg ⁻¹)	5	10	15
pH(≤7.0)	4.5	5.5	6.5
pH(>7.0)	9	8	7
总磷(TP)(g·kg ⁻¹)	0.4	0.6	1.0
总氮(TN)(g·kg ⁻¹)	0.75	1.50	2.00
总钾(TK)(g·kg ⁻¹)	5	20	25

注: X_a 、 X_b 、 X_c 为分级指标。

本研究采用的评价指标有 pH、阳离子交换量、有机质、总磷、总氮和总钾。通过标准化后,同一级别各属性的分肥力系数比较接近,便于对比分析,当某属性测定值超过好的标准(即 $C_i > X_c$)时,肥力系数不再提高,反映植物生长对某属性的要求并不是越高越好,这与生产实践是相符的,最后采用修正的内梅罗公式计算综合肥力系数^[16-17]:

$$P = \sqrt{\frac{(\overline{P_i})^2 + (P_{i\min})^2}{2}} \times \frac{(n-1)}{n}$$

式中: P 为土壤综合肥力系数; $\overline{P_i}$ 为土壤各属性分肥力系数的平均值; $P_{i\min}$ 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。其土壤肥力分级标准为:当 $P \geq 2.7$,说明土壤处于很肥沃状态;当 $1.8 \leq P < 2.7$,说明土壤处于肥沃状态;当 $0.9 \leq P < 1.8$,说明土壤肥力一般;当 $P < 0.9$,说明土壤贫瘠。

1.5 数据分析

采用 Excel 2019 软件对试验数据进行基础处理。采样点图数据源为 MapBox 卫星地图,使用 ArcGIS 10.8.1 标注并绘制各采样点图。

2 结果与分析

2.1 研究区土壤肥力参数

2.1.1 土壤 pH 特征 pH 是影响土壤肥力最主要的因素之一,直接关系到植物能否正常生长。土壤 pH 是土壤化学性质和肥力高低的重要指标,对土壤环境和植被生长具有重要影响^[18]。由表 3 可知,69 个采样点土壤环境 pH 为 5.77~7.78,甘曲湿地、巴嘎雪湿地、拉鲁湿地和茶巴朗湿地的 pH 平均值分别为 6.73,6.39,6.49,6.85,整体的 pH 均值为 6.62,表明研究区湿地土壤 pH 整体处于中性状态,其中,个别采样点 pH 为 5.77,但与均值差异不大,该样点植物资源丰富,在土壤环境中易累积更多的有机代谢产物,而有机质分解过程中生成腐殖酸等^[11],是导致采样点 pH 相对较低的可能原因。整体来看,研究区湿地土壤 pH 与曹丽花等^[19]与拉萨农作区土壤相比有所不同,但与西藏林芝地区土壤 pH 的差异性不大^[6],可能是因为湿地环境不同于普通农作区域,但与林芝市气候环境类似,水汽来源充沛,且地势低洼具备形成淋溶条件^[6];此外,土壤酸碱度与湿地内丰富的微生物活动程度也存在一定的相关性^[20]。变异系数(CV)能反映人类活动的影响,土壤 pH 变异系数为 2.50%~7.00%(表 3),说明研究区内土壤 pH 属于弱变异^[21],表明研究区湿地土壤酸碱碱性较为稳定且空间分布均匀。

2.1.2 土壤有机质特征 有机质是土壤养分最重要的组成,决定土壤生产力最重要的因素,是土壤微生物的动力来源,在协调土壤透气性、吸附能力、缓冲能力、保持水分和养分等方面作用重大,土壤肥力高低与有机质的品质和含量关系密切^[6,22]。由表 3 可知,研究区湿地土壤有机质含量为 16.01~211.00 g/kg,平均值为 61.82 g/kg,有机质含量由高到低依次为甘曲湿地(68.93 g/kg)>巴嘎雪湿地(64.48 g/kg)>拉鲁湿地(57.26 g/kg)>茶巴朗湿地(56.60 g/kg),按照第二次全国土壤普查的分级标准^[14],说明研究范围内湿地有机质处于很丰富的水平(1 级)。研究区有机质含量明显高于拉萨其他区域土壤,是因为湿地气候湿润,动植物大量生长繁殖后,随着四季交替,其残体通过微生物分解进入土壤环境,且拉萨的高寒高海拔缺氧条件,使得土壤中有机质分解速度极其缓慢,有机质的累积储量高,其结果与庾泊楠等^[3]对拉萨河上游的西藏麦地卡湿地土壤研究结果相似。由表 3 可知,有机

质变异系数为 48.24%~80.30%,属高强度变异,表明湿地土壤中有机质含量的空间分布不均匀。

2.1.3 土壤阳离子交换量特征 土壤阳离子交换量(CEC)是指土壤胶体所能吸附的阳离子总量,其值体现土壤保肥能力,阳离子交换量越大说明土壤保肥能力越强。在农业上一般认为土壤阳离子交换量 <10 cmol/kg 时,保肥能力弱;阳离子交换量在 $10\sim20$ cmol/kg,保肥能力适中;阳离子交换量 >20 cmol/kg 时,保肥能力较强^[23]。研究区湿地土壤整体平均阳离子交换量为 35.55 cmol/kg(表 3),高于 20 cmol/kg,表明其具有较强的保肥能力。甘曲湿地土壤 CEC 均值最大,为 50.60 cmol/kg;茶巴朗湿地次之,CEC 的平均值为 41.12 cmol/kg;而拉鲁湿地和巴嘎雪湿地的 CEC 平均值较低,分别为 23.02,27.47 cmol/kg。由表 3 可知,阳离子交换量变异系数为 34.00%~67.00%,变异系数大,这表明研究区湿地土壤的阳离子交换量空间分布不均匀。

2.1.4 土壤总氮特征 氮元素既是植物生长所需要的养分元素,又是衡量土壤肥力的一个重要指标,在土壤中氮可以分成无机态氮和有机态氮,二者之和为总氮,有机态氮为主要存在形式^[6]。由表 3 可知,研究区湿地土壤中总氮含量均值为 3.13 g/kg,大于 2 g/kg,为 1 级水平,处于很丰富的状态。甘曲湿地土壤总氮含量的均值最高,为 3.91 g/kg,其次是巴嘎雪湿地,其土壤总氮含量为 3.08 g/kg,拉鲁湿地和茶巴朗湿地土壤总氮含量的均值分别为 2.80,2.73 g/kg。已有研究^[24]表明,土壤中有有机质在矿化过程中释放大量的氮元素,通过分析表 3 可知,4 个湿地的有机质平均含量和总氮平均含量变化规律基本一致,说明土壤有机质和总氮含量相互影响,与任静雯等^[25]的研究结论相似。总氮的变异系数范围为 39.00%~66.00%,属于高强度变异,说明湿地土壤总氮含量的空间分布不均匀。

2.1.5 土壤总磷特征 磷是作物生长的必需元素,土壤中的磷元素含量在某种程度上反映土壤的储存和供肥能力,磷含量与其形态、土壤酸碱性、有机质含量等因素有关^[6,13]。研究区湿地土壤中的总磷含量均值为 0.75 g/kg,处于 0.6~0.8 g/kg(表 3),属于 3 级水平,即适中等级,略高于拉萨农田土壤中磷含量^[6],与湿地土壤有机质含量高有关,同时湿地内丰富的微生物改善了土壤中磷酸酶活性,也有利于有效磷累积^[1]。拉鲁湿地和茶巴朗湿地土壤中总磷的平均含量均处于丰富等级,分别为 0.81,0.83 g/kg,而在甘曲湿地和巴嘎雪湿地土壤中均属于适中等级,分别为 0.71,0.66 g/kg。由表 3 可知,总磷的变异系数范围为 14.00%~30.40%,仅甘

曲湿地变异系数为 30.40%,属于中等强度变异,该湿地紧靠城镇,且疏于管理,受到外来因素影响,另外 3 个湿地的变异程度较低。

2.1.6 土壤总钾特征 钾也是作物生长的必需营养元素,参与作物的多种生理过程,土壤中的钾含量主要与母质、成土条件、质地、施肥量等因素有关^[6]。研究区湿地土壤中的总钾平均含量为 18.05 g/kg,在 15~20 g/kg(表 3),属于适中等级(3 级水平)。茶巴朗湿地土壤中的总钾含量均值最高,为 19.84 g/kg,其次巴嘎雪湿地土壤为 19.30 g/kg,拉鲁湿地和甘曲湿地土壤中的总钾含量均值分别为 17.33,5.72 g/kg。由表 3 可知,总钾的变异系数范围为 6.00%~11.00%,属于弱变异,说明湿地土壤的总钾含量空间分布较均匀。整体看来,研究区湿地总钾含量高于西藏农作区和林区土壤中总钾含量^[5-6],由矿物风化后产生的钾保留在土壤中,随着风力、雨水冲刷等外力作用下,在地势低洼处湿地内得到累积,同时湿地土壤黏粒含量高,也是研究区的总钾含量相对高,且分布均匀的因素之一^[5,26]。

2.1.7 土壤全盐特征 土壤中的盐分可以反映土壤矿物质元素的含量状况,土壤中盐分过高会造成作物生长不良,甚至死亡,盐分过低则不利于植物健康生长^[10]。由表 3 可知,研究区湿地土壤中的全盐含量均值为 0.92 g/kg。4 个湿地的全盐含量为甘曲湿地 $>$ 巴嘎雪湿地 $>$ 茶巴朗湿地 $>$ 拉鲁湿地。甘曲湿地的全盐均值含量最高,为 1.15 g/kg,可能与周边人类的农牧业活动中肥料的使用有关^[27]。拉鲁湿地的全盐均值含量最低,为 0.73 g/kg。由表 3 可知,全盐的变异系数范围为 42.00%~60.00%,属于高强度变异,说明研究区湿地土壤全盐含量空间分布不均匀。

2.1.8 土壤电导率特征 土壤中盐类溶于水,使水溶液具有导电作用,电导率反映其导电性能,盐分还可以通过离子交换作用影响胶体的交换基,从而影响阳离子交换量^[10,28]。研究区 4 个湿地 69 个采样点土壤环境电导率范围为 0.51~13.33 mS/m(表 3),电导率平均值为 2.97 mS/m,排序为拉鲁湿地 $>$ 茶巴朗湿地 $>$ 甘曲湿地 $=$ 巴嘎雪湿地。由表 3 可知,电导率的变异系数范围为 62.20%~91.00%,属于高强度变异,说明湿地土壤的电导率空间分布不均匀。土壤电导率影响动植物的活性和土壤养分的传输与转化,在农林业生产中有重要指导意义,与曹丽花等^[19]对拉萨农作区土壤研究结果相似。电导率高且变异系数大的特点,可能因为拉萨气候干燥、降雨少、日照强度大等导致水分蒸发,引起盐分聚集。

2.1.9 土壤氧化还原电位特征 研究区土壤的氧化

还原电位(redox potential)为-55~110 mV(表 3),参考沉积物中 Eh 与氧化还原环境的关系,当 $Eh < 0$ mV 时,土壤呈强还原性,当 Eh 值在 0~200 mV 时,土壤呈还原性^[10]。甘曲湿地的 22 个样点中,其中 9 个呈还原性,13 个呈强还原性,平均值为-0.27 mV;巴嘎雪湿地的 11 个样点中, Eh 均在 0~200 mV,平均值为 83.27 mV,呈还原性;拉鲁湿地的 17 个样点中,7 个表现为还原性,10 个表现为强还原性,平均值为-8.41 mV;茶巴朗湿地的 19 个样点中,12 个呈现为强还原性,7 个呈现为还原性,平均值为 24.74 mV。湿地土壤呈强还原性的原因为甘曲湿地、拉鲁湿地、茶巴朗湿地均为

沼泽湿地,淹水深度呈周期性变化,致使湿地土壤含水量较高,且多数采样点处土壤环境中有大量动植物残渣等有机质,有机质的分解消耗大量氧,形成强还原环境^[29]。土壤还原环境的形成与强还原环境的形成条件基本类似,巴嘎雪湿地以还原电位为主,是因为其特殊地势特点,湿地内有多出水口,排水通畅,采样点处土壤含水量相对较低。

由表 3 可知,研究区氧化还原电位的变异系数范围为-10 048.00%~184.00%,属于强变异,表明研究区湿地土壤的氧化还原电位变化极其剧烈,空间分布离散度高。

表 3 土壤肥力指标描述性统计特征
Table 3 Descriptive statistical characteristics of soil fertility indicators

样地	肥力指标	最大值	最小值	平均值	变异系数/%
甘曲湿地	pH	7.21	6.49	6.73	2.50
	电导率/(mS·m ⁻¹)	6.76	0.51	2.41	62.20
	Eh /mV	56.00	-55.00	-0.27	-10 048.00
	全盐/(g·kg ⁻¹)	2.75	0.31	1.15	50.00
	有机质/(g·kg ⁻¹)	151.52	0.66	68.93	51.78
	CEC/(cmol·kg ⁻¹)	103.51	22.49	50.60	41.60
	全氮/(g·kg ⁻¹)	7.43	1.22	3.91	39.00
	全磷/(g·kg ⁻¹)	1.58	0.45	0.71	30.40
	全钾/(g·kg ⁻¹)	17.58	13.34	15.72	6.30
	pH	7.42	5.90	6.39	7.00
巴嘎雪湿地	电导率/(mS·m ⁻¹)	9.01	0.77	2.41	91.00
	Eh /mV	110.00	60.00	83.27	20.00
	全盐/(g·kg ⁻¹)	1.79	0.28	1.05	42.00
	有机质/(g·kg ⁻¹)	211.00	16.01	64.48	80.30
	CEC/(cmol·kg ⁻¹)	64.97	9.80	27.47	67.00
	全氮/(g·kg ⁻¹)	7.89	0.87	3.08	62.00
	全磷/(g·kg ⁻¹)	0.83	0.50	0.66	15.00
	全钾/(g·kg ⁻¹)	21.54	14.04	19.30	10.00
	pH	7.07	5.77	6.49	5.00
	电导率/(mS·m ⁻¹)	13.33	0.65	3.70	83.00
拉鲁湿地	Eh /mV	66.00	-50.00	-8.41	-414.00
	全盐/(g·kg ⁻¹)	1.64	0.18	0.73	60.00
	有机质/(g·kg ⁻¹)	183.78	16.74	57.26	77.87
	CEC/(cmol·kg ⁻¹)	58.10	6.98	23.02	53.00
	全氮/(g·kg ⁻¹)	7.20	1.02	2.80	66.00
	全磷/(g·kg ⁻¹)	1.15	0.63	0.81	16.00
	全钾/(g·kg ⁻¹)	20.23	12.03	17.33	11.00
	pH	7.78	6.56	6.85	4.00
	电导率/(mS·m ⁻¹)	10.46	0.57	3.36	77.00
	Eh /mV	95.00	-54.00	24.74	184.00
茶巴朗湿地	全盐/(g·kg ⁻¹)	1.66	0.19	0.74	52.00
	有机质/(g·kg ⁻¹)	109.72	20.31	56.59	48.24
	CEC/(cmol·kg ⁻¹)	83.95	23.36	41.12	34.00
	全氮/(g·kg ⁻¹)	5.09	1.15	2.73	43.00
	全磷/(g·kg ⁻¹)	1.16	0.65	0.83	14.00
	全钾/(g·kg ⁻¹)	22.13	17.74	19.84	6.00

2.2 研究区土壤综合肥力评价与分析

研究区湿地土壤综合肥力系数(P)为 1.86~2.01(表 4),均值为 1.94,略高于一般水平,属于肥沃等级,各湿地排序为茶巴朗湿地(2.01)>巴嘎雪湿地(1.95)>拉鲁湿地(1.93)>甘曲湿地(1.86)。从土壤分肥力系数(P_i)均值来看,CEC(3)=有机质(3)=总氮(3)>pH(2.97)>总磷(2.35)>总钾(1.86),CEC、有机质、pH 和总氮为“很肥沃”指数段,总磷和总钾为“肥沃”指数段,影响

湿地土壤综合肥力的指标是总钾。从各个湿地分肥力系数现状来看,除甘曲湿地总钾 P_i (1.86)略低,但差异性不大,其他 P_i 基本一致。尘土母质的类型决定土壤养分水平,湿地的养分主要由补给水中元素来供给,若运输环境不发生明显变化,由河水运移带来的物质形成的沉积物成分应相似^[1,5],研究对象皆为拉萨河下游的天然湿地,补给水也以拉萨河水为主,因此,各湿地土壤养分特征基本一致。

表 4 湿地土壤综合肥力评价

Table 4 Evaluation of comprehensive fertility of wetland soil

采样地	分肥力系数(P_i)						综合肥力(P)	肥力等级
	CEC	有机质	总氮	总磷	总钾	pH		
甘曲湿地	3	3	3	2.26	1.71	3.00	1.86	肥沃
巴嘎雪湿地	3	3	3	2.15	1.95	2.89	1.95	肥沃
拉鲁湿地	3	3	3	2.53	1.82	2.99	1.93	肥沃
茶巴朗湿地	3	3	3	2.58	1.99	3.00	2.01	肥沃

3 结论

(1)研究区湿地土壤具有较强的保肥能力,pH 为 6.62,呈中性。研究区土壤有机质和总氮含量丰富,分别为 61.82,3.13 g/kg,均为 1 级水平;总磷和总钾含量适中,分别为 0.75,18.05 g/kg,为第 3 级水平,主要养分高于西藏其他农林作物区;电导率平均值为 2.97 mS/m,土壤的氧化还原电位(redox potential)为-55~110 mV,以(强)还原性为主。

(2)利用改进的内梅罗综合指数法对研究区湿地土壤进行评价,综合肥力系数(P)大小为茶巴朗湿地(2.01)>巴嘎雪湿地(1.95)>拉鲁湿地(1.93)>甘曲湿地(1.86),均值为 1.94,属于肥沃等级,影响湿地土壤综合肥力的指标是总钾。研究区的 4 个天然湿地因形成条件和外界环境相似,各湿地之间综合肥力表现基本一致。

参考文献:

- [1] 周贵尧,吴沿友,张明明.泉州湾洛阳江河口湿地土壤肥力质量特征分析[J].土壤通报,2015,46(5):1138-1144.
ZHOU G Y, WU Y Y, ZHANG M M. Study on the characteristics of soil fertility quality of estuarine wetlands in Luoyang River of Quanzhou Bay[J].Chinese Journal of Soil Science,2015,46(5):1138-1144.
- [2] MITSCH W J, ZHANG L, WALETZKO E, et al. Validation of the ecosystem services of created lands: Two decks of plantsuccess, nutrient retention, and carbon Sequestration experimental riverine marks[J].Ecological Engineering,2014,72:11-24.
- [3] 庾泊楠,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 fertility in the Mitika Wetland National Nature Reserve, Tibet, China[J].Journal of Soil and Water Conservation,2022,36(5):287-295.

- [4] 徐东,何建清,张格杰,等.化肥配施园林废弃物堆肥对青稞产质量及土壤肥力的影响[J].作物杂志,2023(2):214-221.
XU D, HE J Q, ZHANG G J, et al. Effects of fertilizer combined with garden waste compost on yield, quality of highland barley and soil fertility[J].Crops,2023(2):214-221.
- [5] 罗红,普布顿珠,朱雪林,等.西藏人工造林作业区土壤肥力评价[J].应用生态学报,2017,28(5):1507-1514.
LUO H, PU B D Z, ZHU X L, et al. Soil fertility evaluation of artificial afforestation areas in Tibet, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2017,28(5):1507-1514.
- [6] 钟国辉,田发益,旺姆,等.西藏主要农区农田土壤肥力研究[J].土壤学报,2005,42(6):1030-1034.
ZHONG G H, TIAN F Y, WANG M, et al. Soil fertility of croplands in major agricultural areas in Tibet[J]. Acta Pedologica Sinica,2005,32(6):1030-1034.
- [7] 张子琦,焦菊英,陈同德,等.拉萨河流域中下游洪积扇土壤养分评价[J].植物营养与肥料学报,2022,28(11):2082-2096.
ZHANG Z Q, JIAO J Y, CHEN T D, et al. Soil nutrient evaluation of alluvial fan in the middle and lower reaches of Lhasa River Basin[J].Journal of Plant Nutrition and Fertilizers,2022,28(11):2082-2096.
- [8] 古桑群宗,拉多,武俊喜,等.拉萨河流域亏组山种子植物资源及地理区系组成[J].高原科学研究,2019,3(3):21-27.
GU S Q Z, LA D, WU J X, et al. Studies on seed plant resources and geographical composition in Kuizu Mountain in Lhasa[J].Plateau Scientific Research,2019,3(3):21-27.

- [9] 普布,向丹丹,司廉邦,等.西藏甘曲湿地秋季土壤肉鞭虫多样性研究[J].西藏大学学报,2015,30(2):9-15.
PUR B, XIANG D D, SI L B, et al. Biodiversity of soil sarcodines and flagellates in autumn at Ganqu Wetland, Tibet[J]. Journal of Tibet University, 2015, 30(2): 9-15.
- [10] 孙晶. 拉萨河流域下游湿地土壤重金属分布特征和生态风险评价[D]. 拉萨: 西藏大学, 2022.
SUN J. Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in wetland soil in the lower reaches of Lhasa River Basin [D]. Lhasa: Tibet University, 2022.
- [11] 田瀚鑫,王佳俊,周磊,等.西藏拉鲁湿地不同时期水质现状及污染评价[J].环境工程,2021,39(6):198-206.
TIAN H X, WANG J J, ZHOU L, et al. Water quality status and pollution assessment of Lahu Wetland in Tibet in different periods[J]. Environmental Engineering, 2021, 39(6): 198-206.
- [12] 朱仁,隋晓云,孙欢欢,等.西藏拉鲁湿地和茶巴朗湿地外来鱼类群落结构及变动趋势[J].水生生物学报,2022,46(12):1761-1769.
ZHU R, SUI X Y, SUN H H, et al. Communities structure and its changes of non-native fish from Lahu Wetland and Chabalong Wetland of Tibet Autonomous Region[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2022, 46(12): 1761-1769.
- [13] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agricultural Publishing House, 2000.
- [14] 中国土壤调查办公室.全国第二次土壤普查养分分级标准[M].北京:中国农业出版社,1979.
China Soil Investigation Office. Nutrient grading standards for the second national soil census [M]. Beijing: China Agricultural Publishing House, 1979.
- [15] 吴科生,车宗贤,包兴国,等.甘肃省武山县土壤养分特征及综合肥力评价[J].中国土壤与肥料,2021(3):347-353.
WU K S, CHE Z X, BAO X G, et al. Distribution characteristics of soil nutrients in Wushan district in Gansu Province [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2021(3): 347-353.
- [16] 周伟,王文杰,张波,等.长春城市森林绿地土壤肥力评价[J].生态学报,2017,37(4):1211-1220.
ZHOU W, WANG W J, ZHANG B, et al. Soil fertility evaluation for urban forests and green spaces in Changchun City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(4): 1211-1220.
- [17] 周伟,王文杰,何兴元,等.哈尔滨城市绿地土壤肥力及其空间特征[J].林业科学,2018,54(9):9-17.
ZHOU W, WANG W J, HE X Y, et al. Soil fertility and spatial variability of urban green land in Harbin [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2018, 54(9): 9-17.
- [18] 向娇,宋超,石迎春,等.安徽省六安地区土壤 pH 空间变异特征及其影响因素[J].土壤通报,2021,52(1):34-41.
XIANG J, SONG C, SHI Y C, et al. Spatial variation characteristics and influencing factors of soil pH in the Lu'an area of Anhui Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(1): 34-41.
- [19] 曹丽花,刘合满,普塔拉.西藏主要农作物区土壤 pH 值和电导率分布特征及其相关性分析[J].西南农业学报,2016,29(5):1189-1192.
CAO L H, LIU H M, PU T L. Distribution characteristics and correlation analysis between soil pH and electrical conductivity in Tibet field[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2016, 29(5): 1189-1192.
- [20] 桑文秀,杨华蕾,唐剑武.不同土地利用类型土壤温室气体排放对温湿度的响应[J].华东师范大学学报(自然科学版),2021,218(4):109-120.
SANG W X, YANG H L, TANG J W. Response of soil greenhouse gas emissions to temperature and moisture across different land-use types[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2021, 218(4): 109-120.
- [21] 邢书昆,张光辉,朱平宗.黄土丘陵沟壑区退耕年限对根—土复合体抗剪强度的影响[J].水土保持学报,2021,35(4):41-48,54.
XING S K, ZHANG G H, ZHU P Z. Effects of vegetation restoration age on shear strength of root-soil system in hilly and gully region of the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 41-48, 54.
- [22] 杨剑虹,王成林,代亨林.土壤农化分析与环境监测[M].北京:中国大地出版社,2008.
YANG J H, WANG C L, DAI H L. Soil agrochemical analysis and environmental monitoring [M]. Beijing: China Dadi Publishing House, 2008.
- [23] 周文洁.北京市通州区不同绿化用地土壤肥力特征及评价[D].北京:北京林业大学,2020.
ZHOU W J. Characteristics and evaluation of soil fertility of different greening lands in Tongzhou district, Beijing [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [24] 何琪琳,张风宝,杨明义.渭河陕西段河道沉积物中碳氮磷来源分析及污染评价[J].水土保持学报,2020,34(2):50-55.
HE Q L, ZHANG F B, YANG M Y. Source analysis and pollution evaluation of carbon, nitrogen and phosphorus in river sediments of the Weihe River in Shaanxi Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(2): 50-55.
- [25] 任静雯,王佳俊,周磊.拉鲁湿地沉积物碳氮磷分布及污染风险评价[J].生态与农村环境学报,2021,37(2):172-181.

- REN J W, WANG J J, ZHOU L, et al. Distribution of carbon, nitrogen and phosphorus in sediments of Lhalu wetland in dry and wet seasons and it's pollution risk assessment[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(2): 172-181.
- [26] 刘智杰, 黄丽, 李峰, 等. 秸秆还田对水稻土黏土矿物组成和钾素释放的影响[J]. *土壤通报*, 2018, 49(6): 1390-1396.
- LIU Z J, HUANG L, LI F, et al. Effects of straw returning on clay mineral composition and potassium release in paddy soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49(6): 1390-1396.
- [27] 张锴慧. 邢家渡引黄灌区土壤水盐运移变化特征研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- ZHANG K H. Study on the characteristics of soil water and salt transport and change in Xingjiadu Yellow River diversion irrigation area [D]. Ji'nan: Shandong University, 2018.
- [28] 张丽微, 陈雷, 朱丽清, 等. 广西沙塘林场 2 种人工林土壤 pH 与电导率的研究[J]. *河池学院学报*, 2017, 37(5): 34-38.
- ZHANG L W, CHEN L, ZHU L Q, et al. Study of pH and electric conductivity of the soil from two planted forest at Shatang of Guangxi Province [J]. *Journal of Hechi University*, 2017, 37(5): 34-38.
- [29] 曹明, 朱启林, 汤水荣, 等. 添加秸秆及其生物质炭对淹水条件下砖红壤 N_2O 和 CH_4 排放的影响[J]. *土壤通报*, 2021, 52(4): 895-902.
- CAO M, ZHU Q L, TANG S R, et al. Effects of corn straw and its biochar application on N_2O and CH_4 emissions from laterite soil under strong reductive condition[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(4): 895-902.
- (上接第 327 页)
- [23] 周颖, 杨秀春, 徐斌, 等. 我国防沙治沙政策的演进历程与特征研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2020, 34(1): 123-131.
- ZHOU Y, YANG X C, XU B, et al. Evolution and characteristics of China's national defense policies for sand control[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020, 34(1): 123-131.
- [24] 付乐, 迟妍妍, 于洋, 等. 2000—2020 年黄河流域土地利用变化特征及影响因素分析[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(10): 1927-1938.
- FU L, CHI Y Y, YU Y, et al. Characteristics and driving forces of land use change in the Yellow River Basin from 2000 to 2020 [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(10): 1927-1938.
- [25] 郭瑞, 刘蔚, 李宗省, 等. 祁连山甘肃片区土地利用变化特征及驱动力[J]. *中国沙漠*, 2023, 43(3): 188-198.
- GUO R, LIU W, LI Z X, et al. An analysis on the land use change characteristics and driving forces in Gansu part of the Qilian Mountain[J]. *Journal of Desert Research*, 2023, 43(3): 188-198.
- [26] 滑永春, 孙小添, 白澳, 等. 基于遥感黄河流域内蒙古段十大孔兑生态环境质量监测评价[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(5): 199-205.
- HUA Y C, SUN X T, BAI A, et al. Monitoring and evaluation of Ten Kongdui eco-environmental quality changes in Inner Mongolia section of the Yellow River Basin based on remote sensing[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(5): 199-205.
- [27] 管亚兵, 杨胜天, 周旭, 等. 黄河十大孔兑流域林草植被覆盖度的遥感估算及其动态研究[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 52(4): 458-465.
- GUAN Y B, YANG S T, ZHOU X, et al. Study on shrubs-herbs-arbor vegetation coverage and dynamic changes in the ten tributaries of Yellow River in Inner Mongolia by remote sensing method [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science Edition)*, 2016, 52(4): 458-465.
- [28] 白雪莲, 王理想, 季树新, 等. 鄂尔多斯草原沙漠交错区生态系统健康评价: 以十大孔兑为例[J]. *中国沙漠*, 2020, 40(1): 187-194.
- BAI X L, WANG L X, JI S X, et al. Assessment of ecosystem health in grassland-desert ecotone in northern Ordos: A case study of Ten Tributaries Basin [J]. *Journal of Desert Research*, 2020, 40(1): 187-194.
- [29] 江文甲, 林满红, 翁佩莹, 等. 福建省安溪县土地利用时空演变规律及其关键驱动因素[J]. *生态学报*, 2022, 42(2): 513-527.
- JIANG W J, LIN M H, WENG P Y, et al. Spatio-temporal evolution of land use and its key driving factors in Anxi County of Fujian Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(2): 513-527.
- [30] 刘殿君, 于森森, 孟庆东, 等. 黄河流域鄂尔多斯十大孔兑淤地坝减沙效应[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(2): 42-49.
- LIU D J, YU S M, MENG Q D, et al. Effect of check dams on sediment retention of the Ten Tributaries in the Ordos Basin of the Yellow River Basin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(2): 42-49.