

DOI: 10.11686/cyxb2025187

http://cyxb.magtech.com.cn

李向, 李航, 李润杰, 等. 土壤水力性质对高寒沼泽草甸退化与建植人工草地的响应. 草业学报, 2026, 35(3): 52—67.

LI Xiang, LI Hang, LI Run-jie, et al. Response of soil hydraulic properties to alpine swamp meadow degradation and sown grassland planting. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(3): 52—67.

土壤水力性质对高寒沼泽草甸退化 与建植人工草地的响应

李向^{1,2}, 李航⁴, 李润杰^{1,2,3*}, 张永坤^{3*}

(1. 青海大学土木水利学院, 青海 西宁 810016; 2. 黄河上游生态保护与高质量发展实验室, 青海 西宁 810016; 3. 青海大学三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 青海 西宁 810016; 4. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要:为揭示高寒沼泽草甸退化与人工建植草地对土壤水力性质的影响,本研究以青海省玛沁县天然、轻度退化、重度退化高寒沼泽草甸和人工建植草地(为生态修复于2018年在退化草甸种植的冷地早熟禾)为研究对象,测定了几种基本土壤性质,分析了0~30 cm土层土壤水力性质变化特征及其驱动因素。结果表明:1)生物量、土壤孔隙度、有机碳与总氮含量随高寒沼泽草甸退化与建植人工草地进程推进表现为先降低后升高的趋势($P < 0.05$)。2)0~20 cm土层的土壤持水量、田间持水量、凋萎系数与饱和含水量排序为:天然沼泽草甸>人工草地>重度退化沼泽草甸。饱和导水率在0~10 cm土层显著高于10~30 cm土层,且随草甸退化与建植人工草地进程推进表现为先下降后上升的趋势($P < 0.05$)。3)饱和导水率、饱和含水量、植物有效水含量与土壤孔隙度、有机碳和总氮含量呈显著正相关关系($P < 0.05$),与土壤pH呈显著负相关关系($P < 0.05$)。偏最小二乘回归分析表明:影响土壤水力性质的重要因子是土壤孔隙度与有机碳含量。综上所述,高寒沼泽草甸退化与建植人工草地显著改变了土壤水力性质,对于表层(0~10 cm)土壤影响最为显著,加强表层土壤的研究和保护是高寒沼泽草甸生态修复的关键所在。

关键词:高寒沼泽草甸;退化;人工草地;土壤持水能力;饱和导水率

Response of soil hydraulic properties to alpine swamp meadow degradation and sown grassland planting

LI Xiang^{1,2}, LI Hang⁴, LI Run-jie^{1,2,3*}, ZHANG Yong-kun^{3*}

1. College of Civil and Water Resources Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China; 2. Laboratory of Ecological Protection and High Quality Development of the Upper Yellow River, Xining 810016, China; 3. State Key Laboratory of Sanjiangyuan Ecology and Plateau Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016, China; 4. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China

Abstract: In this research, natural, lightly degraded and heavily degraded marsh meadows, and artificially established sown grassland (established in 2018 by planting *Poa crymophila* on degraded meadows for ecological restoration) in Maqin County, Qinghai Province, were studied. Several key soil properties were measured, and the changes in soil hydraulic properties within the 0—30 cm soil layer, and factors driving the changes were analyzed. The results demonstrated that: 1) Biomass, soil porosity, organic carbon content, and total nitrogen content

收稿日期:2025-05-09;改回日期:2025-06-25

基金项目:国家自然科学基金(42207375)和青海省科技计划(2024-SF-148)项目资助。

作者简介:李向(1998—),男,河南商丘人,在读硕士。E-mail: 2935008789@qq.com

*通信作者 Corresponding author. E-mail: zhangyongkun321@163.com; rjl@126.com

exhibited a trend of initial decrease and then increase with the degradation of alpine marsh meadows and the establishment of artificial sown grassland ($P < 0.05$). 2) In the 0–20 cm soil layer, the ranking of soil water holding capacity, field capacity, wilting coefficient, and saturated water content was as follows: natural marsh meadow > artificially established sown grassland > heavily degraded marsh meadow. Saturated hydraulic conductivity in the 0–10 cm soil layer was significantly higher than that in the 10–30 cm soil horizon and decreased significantly with the degradation of alpine marsh meadows while increasing significantly with the establishment of artificially sown grassland ($P < 0.05$). 3) Saturated hydraulic conductivity, saturated water content, and plant-available water content were significantly positively correlated with soil porosity, organic carbon content, and total nitrogen content ($P < 0.05$), and significantly negatively correlated with soil pH ($P < 0.05$). Partial least squares regression analysis revealed that the critical factors influencing soil hydraulic properties were soil porosity and organic carbon content. In conclusion, the degradation of alpine marsh meadows and the establishment of artificially sown grassland significantly altered soil hydraulic properties, with the most pronounced impact observed in the surface horizon (0–10 cm). The data indicate that surface soils are the most sensitive to degradation-induced changes; this is an important insight for managing the ecological restoration of alpine marsh meadows.

Key words: alpine marsh meadow; degradation; artificial grassland; soil water holding capacity; saturated hydraulic conductivity

土壤水分保持能力与水分传导能力对于水文循环过程中土壤储水、输水和配水环节产生影响,是土壤水文功能的重要组成部分与影响因素^[1],基于土壤水分运移机理,通过土壤水分特征曲线表征毛管作用与吸附势能的动态耦合,揭示了土壤持水能力与导水效率的动态平衡机制。而饱和导水率值作为达西定律的表征参数,反映了土壤孔隙连通性与水流阻力特征,是研究土壤水力性质的重要参数^[2–4]。了解土壤持水和导水性能的变化及其驱动因素能够更清晰地理解高寒生态系统土壤水文过程。

青藏高原作为地球第三极,是关键的生态枢纽,其高寒沼泽草甸系统通过多维生态服务功能(包括气候系统调节、生物多样性保持、水源涵养和碳汇功能)构成区域生态安全的核心保障^[5–6]。全球沼泽经历了不同程度的退化演替,自 20 世纪 90 年代以来全球沼泽面积萎缩了 50%^[7],其中青藏高原的高寒沼泽草甸也因增温、过度放牧以及鼠害等因素影响而干化程度加剧,湿地逐渐退化为草甸,部分地区甚至退化成裸地^[8–9]。治理三江源区退化草甸目前最主要的方式是建植人工草地^[10],其在黑土滩草地退化问题的治理中取得显著成效,成为当前主流的生态修复方式之一^[11]。土地利用方式与覆被变化会使土壤容重、孔隙度以及有机质等性质发生改变,对土壤持水与导水性质产生影响,而影响植物生长的土壤水分有效性也会发生改变^[12]。草甸退化与建植人工草地会使覆被变化,一定程度上对土壤的水力性质产生影响。

青藏高原东北缘的三江源区作为长江、黄河、澜沧江三大江河的源头涵养区,也是三大水系的发源地;地处青藏高原核心区域,既是该地域的关键组成部分,也是维系高原生态安全的核心屏障区,该地区面积达 3.9×10^5 km²。高寒湿地是其主要生态类型,该地区独特的“水—气—陆”相互作用模式对区域气候调节具有重要反馈效应^[13]。三江源区高寒草甸退化会对土壤水力性质产生影响,尽管已有学者针对高寒草甸退化对土壤水力性质的影响展开系列研究,但相关结论呈现很大差异。例如:孙玉等^[14]研究发现土壤持水能力峰值出现在未退化草甸阶段;Dai 等^[15]研究表明轻度退化草甸阶段土壤持水能力最高;Yi 等^[16]发现特定土层出现持水能力最高的情况。杨永胜等^[17]对三江源泽库高寒草甸研究发现,随草甸退化饱和持水量先逐渐增加后显著降低,退化主要增加土壤入渗。Pan 等^[18]研究发现饱和导水率存在先降后升的现象,而饱和导水率在 0~10 cm 和 40~50 cm 土层出现随退化程度加剧持续降低^[19]的情况。这些研究成果之间的差异表明青藏高原土壤水力性质空间上具有高度可变性。尽管已有许多关于草地退化对于土壤水力性质影响的研究,但以上研究主要局限于高寒草甸透水性能,持水性能局限于饱和含水量、田间持水量的简单分析,缺乏对土壤持水性能的系统分析。高寒沼泽草甸因其特殊的湿地—陆

地过渡特征^[20]。其群落组成和根系特点与高寒草甸具有显著差异^[21]。其水力性质对退化的响应机制与典型高寒草甸存在本质差异,但相关研究仍较为少见。此外,对于人工草地恢复的研究主要集中在草地恢复对于土壤养分^[22]、微生物生物量^[23]、土壤团聚体^[24]等方面。因此深入了解高寒沼泽草甸退化以及建植人工草地后土壤水力性质的变化特征及其驱动因素具有重要意义。

基于此,本研究以玛沁县高寒沼泽草甸退化序列(天然→轻度退化→重度退化)与人工建植草地[2018年建植冷地早熟禾(*Poa acrymophila*)]为研究对象,测定不同退化阶段高寒沼泽草甸及人工草地土壤水分特征曲线、饱和导水率、植物有效水含量和饱和含水量以及关键的土壤基本性质,定量分析高寒沼泽草甸退化与人工建植草地的土壤水力性质变化及驱动因素。具体而言:1)探索植被、土壤性质和土壤水力性质变化特征;2)分析沼泽草甸退化与建植人工草地对土壤水力性质的驱动因素。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区位于青藏高原东北缘果洛藏族自治州玛沁县大武滩(34°17′–34°25′ N, 100°26′–100°43′ E)(图1),地处典型高寒湿地生态过渡带,平均海拔(3780±15) m。该区域具有显著的大陆性高原气候特征:年平均气温3.5~3.9℃,1月平均气温-9.7℃(最冷月)与7月平均气温10.0℃(最热月)形成较大的年温差。年降水量在420~560 mm变动,降水集中在植被生长期(5–9月)^[25]。该地区太阳辐射资源丰富,年总辐射量为6238~6299 MJ·m⁻²,年日照时数≥2500 h,年蒸发量为2470 mm^[26]。样地土壤类型为粉质壤土与粉质黏壤土。高寒沼泽草甸植被以藏嵩草(*Kobresia tibetica*)为优势建群种,形成以矮嵩草(*K. humilis*)、小嵩草(*K. pygmaea*)和冷地早熟禾(*P. crymophila*)等为特征种的湿地植物群落。

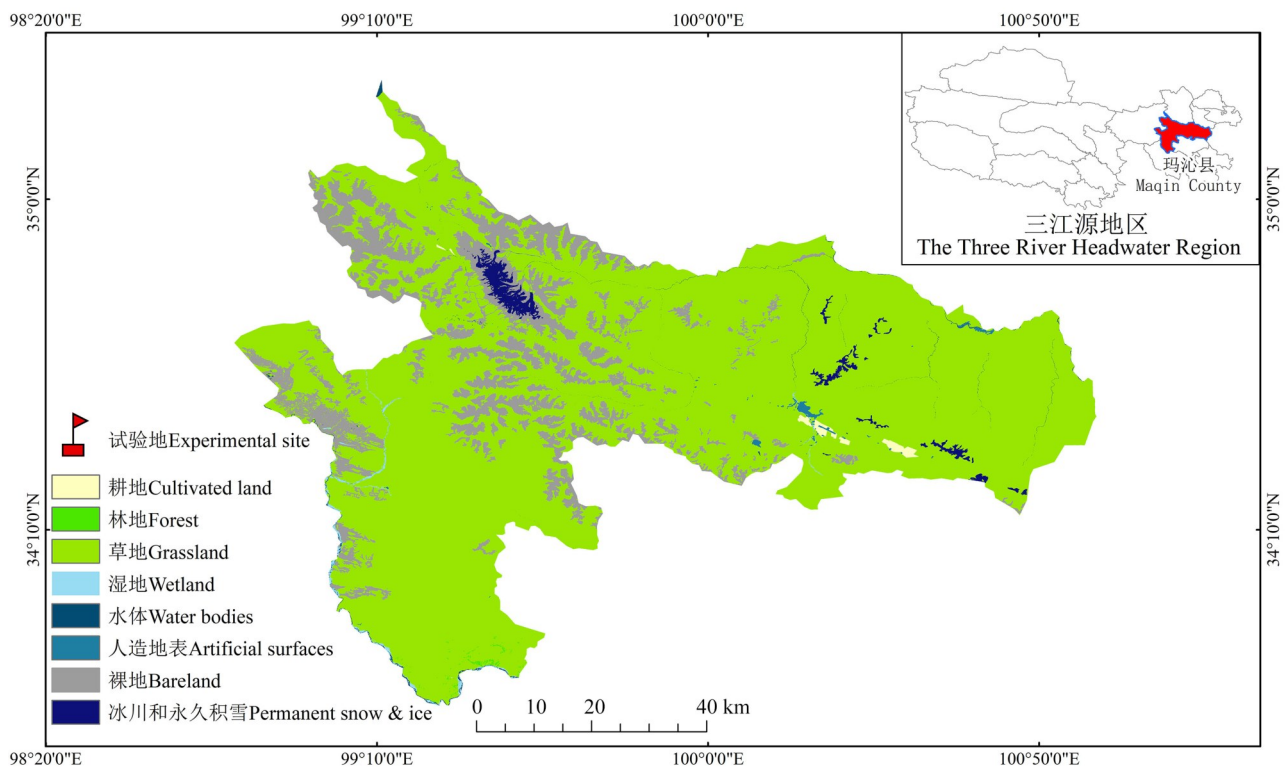


图1 研究区位置信息

Fig. 1 Study area location information

基于自然资源部标准地图服务网站GS(2024)0650号标准地图制作,底图边界无修改。Based on the standard map service website GS(2024)0650 of the Ministry of Natural Resources. The boundary of the base map is not modified.

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 对于退化草甸的分类,在文献中有各种的定性和半定性指标^[27-28]。本研究按高寒草甸退化的相关划分标准^[29]进行划分。1)天然沼泽草甸(natural marsh meadow, NMM):其优势物种藏嵩草平均株高为(32.0±1.5) cm,盖度与叶面积指数均最高;2)轻度退化沼泽草甸(lightly degraded marsh meadow, LDMM):其优势物种矮嵩草株高仅为(3.4±1.0) cm,叶面积指数与株高显著低于天然沼泽草甸;3)重度退化沼泽草甸(heavily degraded marsh meadow, HDMM):相较于轻度退化草甸其盖度较低,株高与叶面积指数相近,但在每年春冬季地表基本全部裸露;夏秋季优势物种为密花香薷(*Elsholtzia densa*)与葵花大蓟(*Cirsium souliei*)等杂草,无优良牧草并且未形成草毡层;4)人工建植草地(artificially established grassland, AEG):人工种植的冷地早熟禾为优势物种,其植被盖度、株高、叶面积指数与天然沼泽草甸无明显差异,4个阶段样地情况具体见图2。各阶段植物群落盖度、株高、叶面积指数和优势物种等指标具体信息见表1。



图2 天然、轻度退化、重度退化沼泽草甸与人工建植草地

Fig. 2 Natural, lightly degraded, heavily degraded marsh meadow and artificially established grassland

表1 研究区样地基本信息

Table 1 Basic information of sample plots in the study area

类型 Type	盖度 Coverage (%)	株高 Plant height (cm)	叶面积指数 Leaf area index	优势物种 Dominant species
NMM	95.0±2.5a	32.0±1.5a	3.9±0.9a	藏嵩草 <i>K. tibetica</i> ; 小嵩草 <i>K. pygmaea</i>
LDMM	91.0±1.0b	3.4±1.0b	1.3±0.3b	矮嵩草 <i>K. humilis</i>
HDMM	82.0±3.5c	3.3±0.3b	1.2±0.3b	夏秋季:密花香薷、葵花大蓟等 Summer-autumn season: <i>E. densa</i> , <i>C. souliei</i> , etc.; 春冬季:裸土 Spring-winter season: Bare soil
AEG	94.0±1.5a	21.3±2.1a	3.0±0.8a	冷地早熟禾 <i>P. crymophila</i>

NMM: 天然沼泽草甸 Natural marsh meadow; LDMM: 轻度退化沼泽草甸 Lightly degraded marsh meadow; HDMM: 重度退化沼泽草甸 Heavily degraded marsh meadow; AEG: 人工建植草地 Artificially established grassland. 数据以平均值±标准误差形式表示。Data are expressed as mean±standard error. 不同小写字母表示不同类型样地间差异显著($P<0.05$)。下同。Different lowercase letters indicate significant differences among types ($P<0.05$). The same below.

1.2.2 样品采集 于2023年8月中旬在进行生态修复的两块样地(相邻的两块样地,一块样地采用建植人工草地方式进行生态修复,另一块采用围栏禁牧的方式进行生态修复)开展取样和植被调查,两块样地内包含表1中不同阶段植被类型。选定天然、轻度退化、重度退化沼泽草甸和人工建植草地,每个处理有4个重复,重复样地大小为5 m×5 m,各样地间间距不超过200 m。每个样地随机设3个0.5 m×0.5 m样方进行常规群落学调查,并测定植被地上生物量(收割法)、高度和盖度等指标。用根钻在样方内0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm深度提取直径为9 cm的土芯,用清水冲洗去除所有的土壤颗粒。将地上生物量(aboveground biomass, ABG)和地下生物量(belowground biomass, BGB)样品带回实验室65℃下烘干至恒重。每个样方挖开剖面,采用两种型号的环刀(100、250 cm³)分别采集0~10 cm深度(2.5~7.5 cm)、10~20 cm深度(12.5~17.5 cm)、20~30 cm深度(22.5~27.5 cm)原状土壤样品。带回实验室进行土壤容重、土壤饱和导水率(100 cm³)和土壤水分特征曲线(250 cm³)的测定。同时,在取原状土壤样品的相同深度收集1000 g左右受扰动的新鲜土样于自封袋中,带回实验室进行土壤机械组成和土壤养分的相关测定。

1.2.3 土壤理化性质测定 对于受扰动的样品,将同一层的样品彻底混合后风干,过1.00和0.25 mm筛后,土壤机械组成采用激光粒度分析仪(Bettersize 3000 Plus,中国)测定,该仪器能够通过湿样品分散和激光衍射分析土壤颗粒成分,计算黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.020 mm)和砂粒(>0.05 mm)含量,依据1951年美国农业部(United States Department of Agriculture, USDA)制定的土壤颗粒分级标准^[18]划分,构建土壤质地三角图(图3)。土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)含量的测定采用重铬酸钾氧化—比色法,土壤pH用雷磁(PHS-3E,中国)酸度计(土水比为1.0:2.5)测量,土壤全碳(total carbon, TC)、全氮(total nitrogen, TN)含量测定采用连续流动分析仪(SEAL-AA3,德国)与进样系统(Auto Sampler X2,德国)。以上指标测定具体操作与样品处理参考鲍士旦^[30]的方法。

1.2.4 土壤水力性质测定 在实验室中,用环刀

法^[31]对土壤样品性质进行测定,具体操作如下:容积(V) 100 cm³环刀采集的原状土样,在环刀盖有孔的一端垫上一层滤纸后将环刀放入水中没过底部浸泡48 h至饱和,称重为 M_1 (g),然后放入底部铺满干砂的托盘上2 h后称重为 M_2 (g),在105 °C烘箱干燥72 h至恒定质量后称重为 M_3 (g),将环刀内土壤样品取出后称环刀重为 M 。土壤容重(bulk density, BD)、土壤饱和含水量(soil saturated water content, SSWC)、土壤总孔隙度(total porosity, TP)、毛管孔隙度(capillary porosity, CP)、非毛管孔隙度(non-capillary porosity, NCP)的计算公式如下:

$$BD = \frac{M_3 - M}{V} \quad (1)$$

$$SSWC = \frac{M_1 - M_3}{M_3 - M} \quad (2)$$

$$TP = \frac{M_1 - M_3}{V} \quad (3)$$

$$CP = \frac{M_2 - M_3}{V} \quad (4)$$

$$NCP = TP - CP \quad (5)$$

采用德国METER公司KSAT型渗透仪测定原状土的饱和导水率。具体操作流程为:将容积100 cm³的不锈钢环刀样品放入水中充分吸水后,通过恒定水头法^[32]测定单位时间内通过单位横截面积的水通量。并计算饱和导水率(saturated hydraulic conductivity, K_s),测定温度控制在(20±1) °C以消除黏滞系数温度效应。使用Ku-pF非饱和导水率测量系统(UMS GmbH,德国)构建土壤水分特征曲线。具体流程包括:将环刀(250 cm³)样品在自由水面浸泡24 h至饱和后取出并在侧孔插入张力计(Tensio130,德国),放置在Ku-pF设备上测定,测量结束后,用露点水势仪(WP4C,中国)对土壤干端水势进行测量;结合土壤湿端和干端水势测定结果,得到土壤基质势与土壤含水量之间的关系。田间持水量(field capacity, FC)和凋萎系数(wilting coefficient, WC)分别对应在一30和一1500 kPa下的土壤含水量,植物有效水含量(plant available water content, PAWC)的计算公式为:PAWC=FC-WC。采用Gardner经验模型^[33]对土壤水分特征曲线进行非线性回归分析。该模型在草原生态系统土壤水分保持机制描述中具有普适性,在此模型中,自变量是土壤基质势值,因变量是土壤含水量。不同土层土壤水分特征曲线通过模型拟合得到a和b参数,公式如下所示:

$$h = a \cdot \theta^{-b}$$

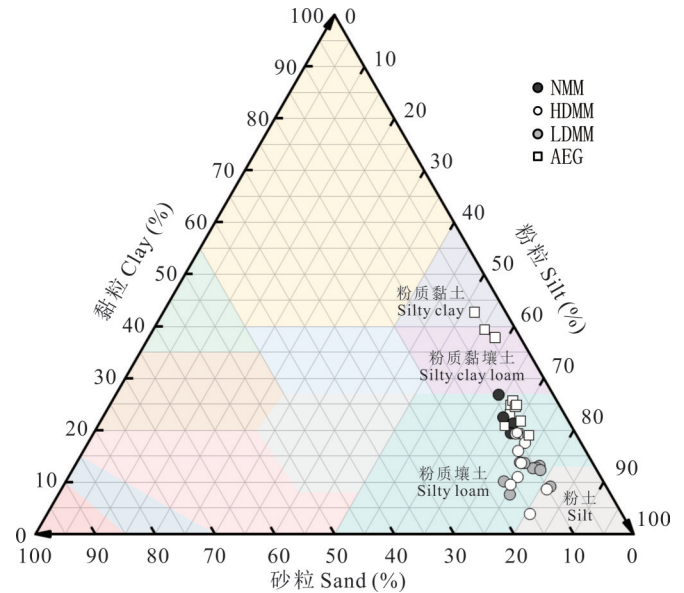


图3 不同退化阶段土壤颗粒组成

Fig. 3 Soil particle composition at different degradation stages and artificially established grassland

式中: θ 为土壤基质势(kPa), h 为土壤含水量(%), a 和 b 是拟合参数,其中参数 a 值越高代表土壤持水能力越好。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 软件对本研究数据进行整合处理,数据的表达方式为平均值 \pm 标准误差(mean \pm standard error)。基于 SPSS 24.0 中的单因素方差分析(One-way ANOVA)与最小显著性差异(least significant difference, LSD)方法分析不同退化阶段高寒沼泽草甸和人工草地不同深度土壤水力特性及土壤理化性质的差异。土壤水力性质与土壤理化性质间的相关性分析采用 Pearson 相关系数法,通过偏最小二乘回归(partial least squares regression, PLS)分析比较影响土壤饱和含水量、土壤饱和导水率、Gardner 模型参数 a (持水性质)和植物有效水含量变量重要性投影(variable importance in projection, VIP)以理解预测因子的重要性。

2 结果与分析

2.1 地上生物量与地下生物量变化

地上生物量随草甸退化程度加剧显著降低,轻度退化阶段地上生物量 $[(254.3\pm 20.9)\text{g}\cdot\text{m}^{-2}]$ 和重度退化阶段地上生物量 $[(241.8\pm 37.4)\text{g}\cdot\text{m}^{-2}]$ 较天然沼泽草甸地上生物量 $[(553.9\pm 29.8)\text{g}\cdot\text{m}^{-2}]$ 分别降低 54.1%、56.3%($P<0.05$);人工草地草甸地上生物量 $[(395.3\pm 27.8)\text{g}\cdot\text{m}^{-2}]$ 较重度退化阶段增加 63.48%($P<0.05$,图 4a)。天然沼泽草甸表层(0~10 cm)土壤中地下生物量最大,随退化程度增加呈减小的趋势。10~20 cm 土层土壤中,轻度退化沼泽草甸阶段地下生物量最大,地下生物量随退化程度增加呈先增加后减小的趋势。人工草地草甸 0~30 cm 土层地下生物量较重度退化阶段增加 114.1%($P<0.05$)。各阶段地下生物量随土壤深度增加急剧下降,并且集中分布在 0~20 cm 土层中,高寒沼泽草甸 20~30 cm 土层地下生物量对草甸退化的响应程度显著低于 0~10 cm 和 10~20 cm 土层(图 4b)。

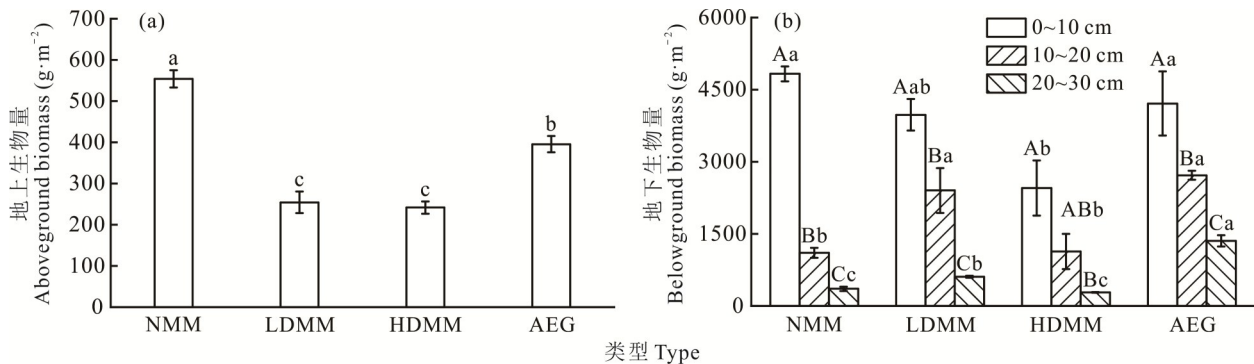


图 4 不同退化阶段地上生物量与地下生物量特征

Fig. 4 Characteristics of aboveground biomass and belowground biomass at different degradation stages and artificially established grassland

不同大写字母表示同一类型不同土层深度差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示同一土层深度不同类型差异显著($P<0.05$)。下同。Different uppercase letters denote significant differences among different soil layers within the same type ($P<0.05$). Different lowercase letters indicate significant differences among different types at the same soil depth ($P<0.05$). The same below.

2.2 基本土壤理化性质

2.2.1 土壤有机碳及 pH 高寒沼泽草甸退化对 0~10 cm 土层土壤有机碳含量和 pH 的影响最为显著,随退化程度加剧土壤有机碳含量显著降低;与天然沼泽草甸相比,重度退化阶段 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm 土层有机碳含量降低 29.9%、46.6%($P<0.05$)、23.8%。人工草地草甸 0~10 cm 土层土壤有机碳含量较重度退化阶段降低 30.7%($P<0.05$),但 10~20 cm、20~30 cm 土层土壤有机碳含量增加 30.6%($P<0.05$)、18.3%。各阶段土层土壤有机碳含量随土层深度增加急剧降低,其中天然沼泽草甸降低趋势最为显著(图 5a)。高寒沼泽草甸 0~10 cm 土层土壤 pH 随退化程度的加剧呈增加的趋势,与天然沼泽草甸相比,重度退化阶段土壤 pH 增加 21.1%($P<0.05$)。10~30 cm 土层土壤 pH 随退化程度加剧先增加后减小。各阶段 0~10 cm 土层土壤 pH 最低,显著低

于10~30 cm土层。人工草地草甸0~10 cm土层土壤pH较重度退化阶段增加10.4%;10~20 cm、20~30 cm土层土壤pH虽有增加,但差异未达到显著水平(图5b)。

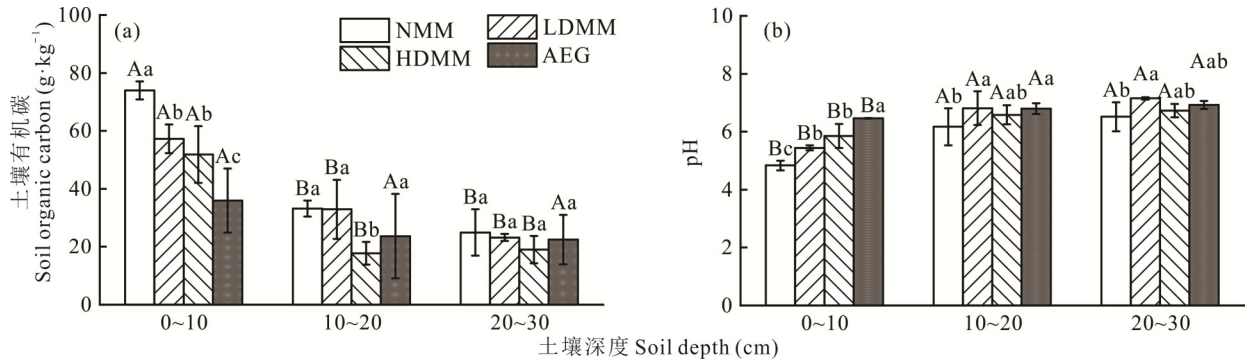


图5 不同退化阶段高寒沼泽草甸和人工建植草地土壤有机碳与pH

Fig. 5 Soil organic carbon and pH in alpine swamp meadows at different degradation stages and artificially established grassland

2.2.2 土壤容重及孔隙度 表2结果显示:高寒沼泽草甸退化对0~10 cm土层土壤容重的影响最为显著,随退化程度加剧土壤容重显著增加;与天然沼泽草甸相比,轻度退化、重度退化沼泽草甸的土壤容重分别增加了23.3%、34.2% ($P < 0.05$)。人工草地草甸0~10 cm土层土壤容重较重度退化阶段降低10.2%,各阶段10~30 cm土层土壤容重无显著差异。天然沼泽草甸0~10 cm土层土壤总孔隙度最高(67.91%),草甸退化使土壤总孔隙度降低。与重度退化阶段相比,人工草地草甸0~10 cm土层土壤总孔隙度无显著差异,但10~20 cm、20~30 cm土层土壤总孔隙度分别增加了12.1%、12.0% ($P < 0.05$)。土壤总孔隙度与毛管孔隙度变化规律相似,与重度退化阶段相比,人工草地草甸10~20 cm、20~30 cm土层土壤毛管孔隙度分别增加了26.6%、12.9% ($P < 0.05$)。重度退化阶段10~20 cm土层土壤非毛管孔隙度最大(8.31%),随草甸退化程度加剧整体呈下降趋势,随土壤深度增加呈不规律的变化趋势。

2.2.3 土壤全碳和全氮含量 表3结果显示:高寒沼泽草甸退化对土壤全碳、总氮含量的影响集中在表层(0~10 cm)土壤,随高寒沼泽草甸退化程度的加剧土壤全碳、总氮含量降低。重度退化阶段0~10 cm、10~20

表2 不同退化阶段高寒沼泽草甸和人工建植草地土壤容重与孔隙度

Table 2 Soil bulk density and porosity of alpine marsh meadows at different degradation stages and artificially established grassland

土壤深度 Soil depth (cm)	类型 Type	容重 Bulk density (g·cm ⁻³)	总孔隙度 Total porosity (%)	毛管孔隙度 Capillary porosity (%)	非毛管孔隙度 Non-capillary porosity (%)
0~10	NMM	0.73±0.07Bc	67.91±2.35Aa	62.82±1.68Aa	5.10±1.02Aa
	LDMM	0.90±0.02Bab	61.61±2.77Ab	57.00±1.92Ab	4.61±1.33Aa
	HDMM	0.98±0.04Aa	62.76±2.45Aab	58.90±2.50Aab	3.86±0.16Ba
	AEG	0.88±0.06Bb	61.83±1.48Ab	57.71±2.36Ab	4.12±1.37Aa
10~20	NMM	1.12±0.03Aa	55.18±4.71Ba	51.65±4.33Bab	3.54±0.58Ab
	LDMM	1.11±0.14Aa	56.76±4.75ABa	53.65±4.90ABa	3.11±0.54Ab
	HDMM	1.11±0.11Aa	51.00±1.86Ba	42.65±3.24Bb	8.31±2.50Aa
	AEG	1.17±0.03Aa	57.19±4.11Aa	54.01±3.99Aa	3.18±0.19Ab
20~30	NMM	1.22±0.14Aa	54.82±3.60Bab	50.07±3.88Bab	4.75±0.28Aa
	LDMM	1.27±0.06Aa	50.03±1.93Bb	46.48±1.05Bb	3.55±0.95Aa
	HDMM	1.09±0.07Aa	51.05±2.78Bb	46.43±1.91Bb	4.63±0.97Ba
	AEG	1.22±0.12Aa	57.19±1.15Aa	52.44±2.16Aa	4.75±1.15Aa

不同大写字母表示同一类型不同土层深度差异显著 ($P < 0.05$)。Different uppercase letters denote significant differences among different soil layers within the same type ($P < 0.05$).

cm、20~30 cm 土层土壤全碳含量较天然沼泽草甸阶段分别下降 29.7%、50.7%、23.8% ($P < 0.05$)；总氮含量分别下降 23.1% ($P < 0.05$)、41.6%、27.9%。人工草地草甸表层(0~10 cm)土壤全碳、总氮含量较重度退化阶段降低 30.7%、33.3% ($P < 0.05$)，而 10~20 cm、20~30 cm 土层土壤全碳含量增加了 33.5% ($P < 0.05$)、18.4%，土壤总氮含量的变化并不显著。不同演替类型之间土壤碳氮比均在 11.5 左右。同时，各阶段土壤全碳、总氮的含量随土壤深度增加而急剧降低，天然沼泽草甸阶段降低趋势最为显著。

表 3 不同退化阶段高寒沼泽草甸和人工建植草地土壤养分含量变化

Table 3 Changes in total nutrient content of soils in alpine marsh meadows at different degradation stages and artificial established grasslands

土壤深度 Soil depth (cm)	类型 Type	全碳 Total carbon ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	总氮 Total nitrogen ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	碳氮比 Carbon to nitrogen ratio
0~10	NMM	73.79±3.08Aa	6.48±0.19Aa	11.63±0.47Aab
	LDMM	57.28±4.98Ab	5.24±0.12Ab	12.02±0.45Aa
	HDMM	51.86±9.76Ab	4.98±0.78Ab	11.13±0.58Ab
	AEG	35.96±11.02Ac	3.32±0.94Ac	12.12±0.10Aa
10~20	NMM	35.97±2.77Ba	3.39±0.28Ba	10.60±0.27Aa
	LDMM	32.93±10.21Ba	3.36±0.96Ba	11.46±0.63Aa
	HDMM	17.73±3.88Bb	1.98±0.40Ba	11.14±2.00Aa
	AEG	23.67±14.59Aab	2.10±1.09Aa	12.56±0.25Aa
20~30	NMM	24.94±8.00Ba	2.69±0.93Ba	11.65±2.40Aa
	LDMM	23.20±1.25Bab	2.66±0.16Ba	11.27±0.46Aa
	HDMM	19.01±4.69Bb	1.94±0.27Ba	12.50±1.52Aa
	AEG	22.50±8.54Aab	2.08±0.82Aa	11.90±0.68Aa

2.3 土壤水力性质

2.3.1 土壤水分特征曲线 图 6 是基于 Gardner 模型拟合高寒沼泽草甸退化与恢复过程不同土层的土壤水分特征曲线，土壤基质势与土壤含水量拟合程度较高，在 4 个阶段都有较高的决定系数 (R^2)。图 6a 显示表层(0~10 cm)参数 a 值随高寒沼泽草甸退化程度增加而减小，轻度退化阶段和重度退化阶段较天然沼泽草甸持水能力分别下降了 17.8%、35.3% ($P < 0.05$)，表层(0~10 cm)人工草地阶段与天然高寒沼泽草甸的持水能力相近均表现出较好的持水能力；图 6b 显示 10~20 cm 土层轻度退化草甸的参数 a 值与人工草地草甸相近，显著高于重度退化阶

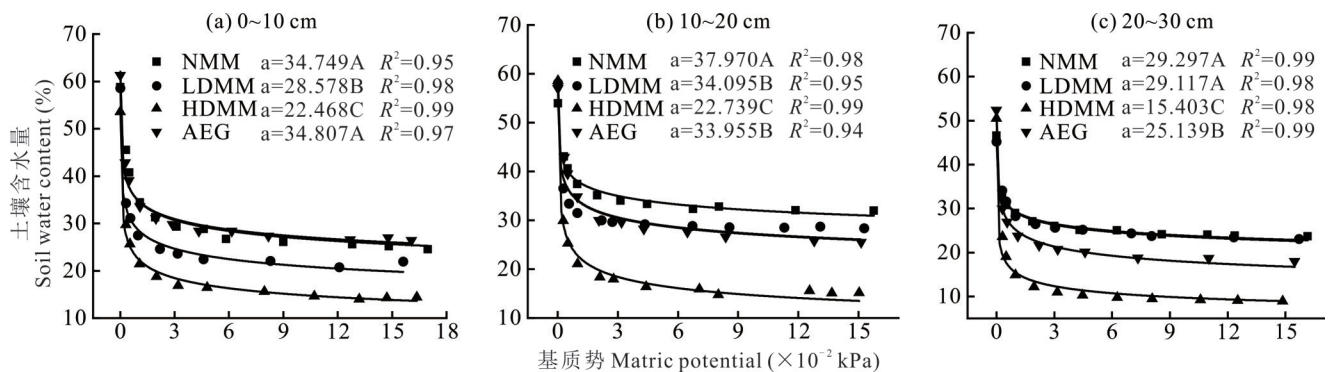


图 6 不同退化阶段土壤水分特征曲线

Fig. 6 Soil water characteristic curves at different degradation stages and artificially established grassland

a 为模型参数 a is the model parameter; 不同大写字母表示同一土层深度不同类型差异显著 ($P < 0.05$)。Different uppercase letters denote significant differences among different types at the same soil depth ($P < 0.05$).

段的参数 a 值, 低于天然沼泽草甸的参数 a 值; 图 6c 显示 20~30 cm 土层轻度退化沼泽草甸的参数 a 值与天然沼泽草甸相近, 显著高于重度退化阶段的参数 a 值, 说明轻度退化对深层土壤的持水性影响非常小, 但重度退化在深层土壤仍有较大影响。整体上, 土壤水分特征曲线及模型拟合的参数 a 值结果显示: 不同演替阶段土壤持水能力随深度增加呈先增加后减小的趋势, 重度退化沼泽草甸每个土层的土壤持水能力均最差, 天然沼泽草甸每个土层持水能力最好。

2.3.2 土壤饱和导水率 土壤饱和导水率结果表明(图 7): 轻度退化沼泽草甸相较于天然沼泽草甸, 表层(0~10 cm)土壤饱和导水率降低 44.89% ($P < 0.05$), 重度退化沼泽草甸相较于轻度退化沼泽草甸, 表层(0~10 cm)土壤饱和导水率降低 74.20% ($P < 0.05$), 人工草地恢复较重度退化沼泽草甸表层(0~10 cm)土壤饱和导水率增加 64.96% ($P < 0.05$); 不同阶段高寒沼泽草甸表层(0~10 cm)土壤饱和导水率最大, 高于 10~20 cm 与 20~30 cm 土层, 10~20 cm 与 20~30 cm 土层土壤饱和导水率并无显著差异, 土壤饱和导水率呈现层间异质性, 其空间分布与地下生物量垂直分布格局整体相似(图 3b)。

2.3.3 土壤饱和含水量和植物有效水含量 表 4 中田间持水量(FC)、凋萎系数(WC)为土壤水分特征曲线在 -30 和 -1500 kPa 下对应的土壤含水量, 其随退化程度的加剧而减小, 表层(0~10 cm)人工草地阶段的田间持水量、凋萎系数与重度退化阶段沼泽草甸无显著差异。整体上 0~30 cm 土层植物有效水含量(PAWC, PAWC = FC - WC)随退化程度的加剧先减小后增大, 0~10 cm 土层, 天然沼泽草甸的植物有效水含量最高, 轻度退化沼泽草甸植物有效水含量最低, 重度退化阶段与人工草地的植物有效水含量差异并不显著, 随土层深度增加植物有效

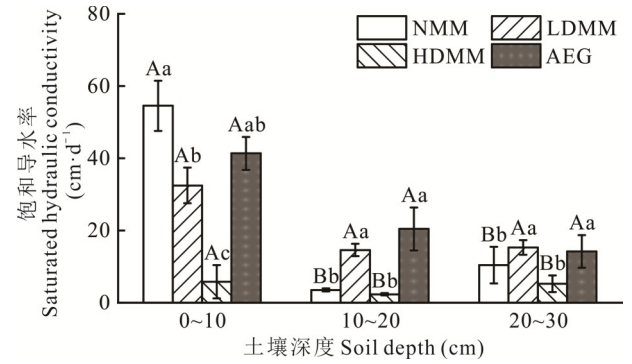


图 7 不同退化阶段高寒沼泽草甸和人工建植草地土壤饱和和导水率

Fig. 7 Saturated hydraulic conductivity of soils in alpine swamp meadows at different degradation stages and artificial established grasslands

表 4 不同退化阶段高寒沼泽草甸和人工建植草地植物有效水含量和土壤饱和含水量

Table 4 Plant-available water content and soil saturated water content in alpine swamp meadow at different degradation stages and artificial established grassland

土层深度 Soil depth (cm)	类型 Type	土壤含水量 Soil moisture content (%)			
		-30 kPa (FC)	-1500 kPa (WC)	PAWC	SSWC
0~10	NMM	45.359a	25.566a	19.793a	68.953a
	LDMM	34.158b	20.980b	13.178b	63.923ab
	HDMM	30.071b	14.148c	15.923b	62.773b
	AEG	30.770b	15.559c	15.212b	63.057b
10~20	NMM	43.247a	28.828a	14.419a	56.523a
	LDMM	40.247ab	27.493a	12.754a	52.363a
	HDMM	28.827b	15.145b	13.682a	58.077a
	AEG	38.253ab	24.371a	13.882a	58.503a
20~30	NMM	33.977a	22.737a	11.240a	56.193ab
	LDMM	32.581a	23.134a	9.447b	52.560ab
	HDMM	22.739b	10.953c	11.786a	51.563b
	AEG	29.865a	18.070b	11.795a	58.503a

FC: 田间持水量 Field capacity; WC: 凋萎系数 Wilting coefficient; PAWC: 植物有效含水量 Plant available water content; SSWC: 土壤饱和含水量 Soil saturated water content. 不同小写字母表示同一土层深度不同类型差异显著 ($P < 0.05$)。Different lowercase letters indicate significant differences among different types at the same soil depth ($P < 0.05$).

和总氮含量对于土壤饱和含水量影响重要预测因子VIP值较高;通过PLS分析可知土壤的持水性能与土壤养分含量以及土壤的孔隙度关系密切。

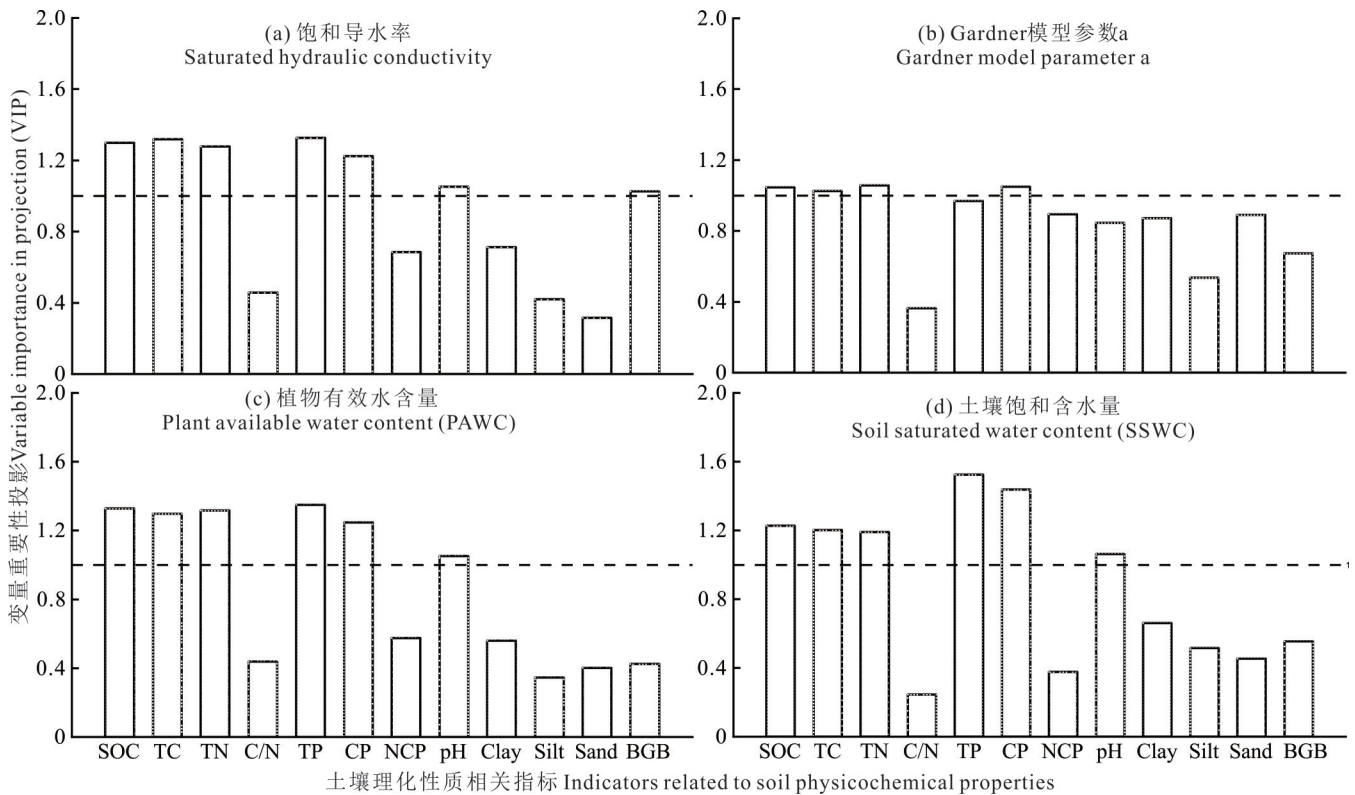


图9 饱和导水率、Gardner模型参数a、植物有效水含量和土壤饱和含水量投影重要性分析

Fig. 9 Projection importance analysis of saturated hydraulic conductivity, Gardner model parameter a, plant available water content, and soil saturated water content

3 讨论

3.1 高寒沼泽草甸退化与恢复对土壤基本性质的影响

气温升高所引起的干旱与多年冻土等因素在草甸退化演替的过程中增加的土壤水分蒸发流失,导致土壤退化进一步加剧。一般来说,草原退化通常伴随着土壤理化性质的变化,如有机质减少、土壤容重增加和保水性降低^[34]。土壤发生的这些变化是土壤物理和化学过程的一部分^[35]。本研究分析结果表明:高寒沼泽草甸生态系统的退化过程显著降低了土壤有机碳(SOC)、全碳(TC)及总氮(TN)的累积量。其中,表层土壤(0~10 cm)的有机碳及总氮含量呈现更为显著的衰减速率,其下降趋势高于较深层土层,与许多研究观测结果具有一致性^[36]。也有部分研究揭示土壤有机碳含量在退化过程中呈现非线性响应特征,即在初期阶段(轻度退化)可能出现暂时性积累,而随着退化程度加剧(中度至重度)则呈现显著下降趋势^[37]。这种响应差异可能源于不同研究采用的草地退化分级标准存在方法学差异,其将草甸的演替阶段划分为4级退化体系,本试验与其有一定差异。尽管许多研究中土壤类型与植被特征存在一定差异,但沿着退化梯度一些土壤基本特性的变化趋势几乎是一致的^[38]。

微生物的活性、植被类型、土壤有机质输入和植被覆盖度等因素是造成土壤有机碳动态变化的主要原因^[39]。首先,高寒沼泽草甸植被盖度、地上生物量、枯落物量^[40]以及根系活动随退化程度的加剧显著减小或消失,有机质输入的减少阻碍了土壤分解进程,进而影响有机质的积累。其次,退化程度严重区域,植被覆盖度低,致使土壤温度升高,进一步通过提升土壤的呼吸强度加速微生物对生物量碳的周转速率^[41],大量土壤有机碳流失;导致土壤环境改变,这可能引发土壤物理、化学和生物过程的一系列变化。表层土壤(0~10 cm)地下生物量对退化的响应较10~30 cm土层更为显著(图4b),表层的土壤养分含量高于深层土壤与表层土壤(0~10 cm)有较多的草甸根

系分布^[42]有关。人工建植草地表层(0~10 cm)土壤相较于重度退化沼泽草甸表层土壤有机碳和总氮含量低,说明土壤营养成分在建植人工草地后并没有得到立即改善,这一结果与 Wu 等^[8]和 Su 等^[43]的研究一致,即人工草地的土壤有机碳与总氮储量随建植年限增加呈先减少后增加的趋势。表层土壤 pH 随退化程度的加剧呈上升趋势,原因可能是研究区位于高海拔区,其土壤水分蒸发强烈,退化导致植被盖度降低引发的蒸散增强效应促进盐分通过毛管作用向地表迁移富集^[44]。

土壤容重作为土壤物理性质的核心评价参数,其大小与土壤的紧实度、孔隙结构特征及水分入渗特性密切相关^[38],本研究结果表明,退化加剧使高寒沼泽草甸表层(0~10 cm)土壤容重增加,但对 10~30 cm 土层土壤容重无显著影响,这一结果与相关学者^[42,45]在三江源高寒草甸的结论部分一致,其主要原因是随退化加剧沼泽草甸根系生物量降低,根系穿插作用增加土壤孔隙度的同时其凋落物残留形成的结构性孔隙与根系微生物群落的代谢活动共同诱导非毛管孔隙比例的系统性增加^[46],改善团聚体稳定性与孔隙连通性的同时降低了土壤紧实度;土壤容重和孔隙度受根系生物量及其分布规律的影响^[47],高寒沼泽草甸植被根系主要分布在表层土壤(0~10 cm)也解释了退化对 10~30 cm 土壤容重无显著影响这一现象。

3.2 高寒沼泽草甸退化与恢复对土壤水力性质的影响因素

高寒沼泽草甸退化进程对土壤持水能力、基质特性及植被群落演替具有显著影响^[48]。本研究发现:土壤持水能力随着高寒沼泽草甸退化的加剧呈显著降低趋势,这一结论与文晶等^[49]的观测结果相符合;在植被未退化阶段土壤饱和导水率最大;也有研究发现,土壤饱和导水率最大值出现在中度退化阶段^[15],这种阶段性响应差异可能源于演替阶段划分标准差异及根系—土壤互馈机制的强度变化。土壤理化性质和持水能力的皮尔逊系数(图 8)结合偏最小二乘回归分析得出,土壤持水能力主要受土壤孔隙度、有机碳和全氮含量影响,这一结论与刘宣等^[50]的观测结果相似。这是因为随高寒沼泽草甸退化程度的加剧,地下生物量显著减少,土壤孔隙度减小,土壤持水能力减弱;相较于天然沼泽草甸,退化沼泽草甸的土壤水分不足使其具有良好的透气性,加速有机碳的矿化分解,并且其有机质的来源降低,不利于有机碳积累;土壤持水能力与土壤有机碳含量呈显著正相关关系可以很好地证明这一结论。本研究结果表明:天然沼泽草甸的持水能力在 10~20 cm 土层最好,高于表层(0~10 cm)土壤,且天然沼泽草甸与轻度退化沼泽草甸土壤持水能力随深度增加先升高后降低(图 6)。这与孙玉等^[14]在三江源区高寒草甸研究发现土壤持水能力随土壤深度的增加而降低的结果不一致,原因可能是高寒沼泽草甸植被复杂,根系缠绕穿插形成草毡层,存在很多的大孔隙,土壤水分可以通过大孔隙优先快速流失^[17],而天然沼泽草甸生态系统的表层基质表现出水分滞留能力不足的特征;随着深度增加,植物根系生物量急剧下降以及草毡层消失,土壤中孔隙减少,使得土壤持水能力较表层土壤有所增加;而重度退化高寒沼泽草甸和人工草地并没有形成草毡层故没有这一规律。表层土壤(0~10 cm)持水能力从轻度退化草甸到重度退化草甸显著降低主要是因为这一演替过程草毡层完全消失,也进一步说明高寒沼泽草甸水源涵养服务功能与草毡层关系密切,这与李婧等^[51]关于高寒矮嵩草草甸的研究结果一致。

本研究结果表明:表土层(0~10 cm)的导水能力与退化梯度呈显著负相关的演变规律,这一结果与其他一些研究是一致的^[52-53]。然而,也有研究报告了饱和导水率不同的变化规律,魏强等^[54]研究表明:轻度退化草甸土壤饱和导水率高于未退化草甸,即饱和导水率随草甸退化先增加后减少;其中饱和导水率在严重退化阶段最差并且远低于未退化阶段,本研究结果与其一致。表层土壤导水功能的显著性响应可能源于高寒沼泽草甸植被的浅根系特征,其根系生物量主要富集于表土层(0~10 cm),根系分布特征通过生物孔隙效应形成无数细小水分传导通路和水分贮存小空间,同时该土层富含强亲水性有机碳—腐殖质复合体及矿物胶结体^[55]。随着退化进程推进,植被群落结构发生梯度性演替^[56],土壤贫瘠化同时伴随土壤有机碳库衰减与矿质组分失衡,引发根系生物量衰减及土壤孔隙度降低,最终导致表层土壤饱和导水率降低。人工建植草地的根系生物量高于重度退化沼泽草甸,其土壤饱和导水率也高于重度退化沼泽草甸进一步证明根系生物量的影响。研究表明:10~30 cm 土层饱和导水率表现为随退化程度加剧先增加后减少的趋势,在其他研究中也发现饱和导水率出现相似的变化趋势,尽管变化幅度有一定的差异^[38],饱和导水率在表层和深层的变化规律与根系分布密切相关(图 4b 和图 7)。土壤大孔隙与

根系渗透和土壤动物活动密切相关^[57],对于轻度退化和重度退化草甸均发现啮齿动物有较强的活动,这可能是深层土壤饱和和导水率随退化进程出现先高后低趋势的原因。

4 结论

相同退化水平的高寒沼泽草甸呈现显著的土壤持水性垂直变异特征:在垂直梯度上,随深度增加持水能力表现出先升后降的变化规律;而在同一土层深度条件下,持水能力与退化梯度呈显著负相关关系,其中表土层(0~10 cm)对沼泽草甸退化的响应敏感性最高。人工草地持水能力与天然沼泽草甸相近,持水能力处于天然沼泽草甸与轻度退化沼泽草甸之间。对于研究区土壤持水能力的影响,土壤总孔隙度、毛管孔隙度、有机碳含量及总氮含量占主导作用,而根系生物量、总孔隙度、毛管孔隙度及有机碳含量等则是饱和导水率变化的关键驱动因子。本研究中人工建植草地土壤质地结构较重度退化沼泽草甸得到明显改善,但人工草地对于土壤养分的改善并不明显,主要与人工草地建植年限有关。因此,对于不同年份人工建植草地对水力特性影响的研究需要加强,在进一步优化三江源地区人工草地建植模式的同时加强对土壤持水能力与土壤营养成分之间关系的研究。

参考文献 References:

- [1] Lou S L, Liu M X, Yi J, *et al.* Influence of vegetation coverage and topographic position on soil hydrological function in the hillslope of the three gorges area. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(13): 4844–4854.
娄淑兰, 刘目兴, 易军, 等. 三峡山地不同类型植被和坡位对土壤水文功能的影响. *生态学报*, 2019, 39(13): 4844–4854.
- [2] Lv G, Wu X Y. Review on influential factors of soil infiltration characteristics. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 34(7): 494–499.
吕刚, 吴祥云. 土壤入渗特性影响因素研究综述. *中国农学通报*, 2008, 34(7): 494–499.
- [3] Su Y, Zhu J, Wang P, *et al.* Research progress on soil water holding capacity. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(14): 140–145.
苏杨, 朱健, 王平, 等. 土壤持水能力研究进展. *中国农学通报*, 2013, 29(14): 140–145.
- [4] Vereecken H, Amelung W, Bauke S L, *et al.* Soil hydrology in the earth system. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(9): 573–587.
- [5] Lu C H, Xie G D, Xiao Y, *et al.* Ecosystem diversity and economic valuation of Qinghai–Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2749–2755.
鲁春霞, 谢高地, 肖玉, 等. 青藏高原生态系统服务功能的价值评估. *生态学报*, 2004, 24(12): 2749–2755.
- [6] Dong S K, Shang Z H, Gao J X, *et al.* Enhancing sustainability of grassland ecosystems through ecological restoration and grazing management in an era of climate change on Qinghai–Tibetan Plateau. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 287: 106683.
- [7] Khaznadar M, Vogiatzakis I N, Griffiths G H, *et al.* Land degradation and vegetation distribution in Chott El Beida wetland, Algeria. *Journal of Arid Environments*, 2008, 73(3): 321–330.
- [8] Wu G L, Liu Z H, Zhang L, *et al.* Effects of artificial grassland establishment on soil nutrients and carbon properties in a black-soil-type degraded grassland. *Plant and Soil*, 2010, 333(1): 469–479.
- [9] Li F, Liu Z H, Jia T H, *et al.* Functional diversity of soil microbial community carbon metabolism with the degradation and restoration of alpine wetlands and meadows. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(17): 6006–6015.
李飞, 刘振恒, 贾甜华, 等. 高寒湿地和草甸退化及恢复对土壤微生物碳代谢功能多样性的影响. *生态学报*, 2018, 38(17): 6006–6015.
- [10] Xing Y F, Wang X L, Liu Y Q, *et al.* Characteristics of plant community and soil organic carbon and nitrogen in artificial grassland with different establishment years. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, 28(2): 521–528.
邢云飞, 王晓丽, 刘永琦, 等. 不同建植年限人工草地植物群落和土壤有机碳氮特征. *草地学报*, 2020, 28(2): 521–528.
- [11] Shang Z H, Dong Q M, Shi J J, *et al.* Research progress in recent ten years of ecological restoration for ‘black soil land’ degraded grassland on Tibetan Plateau—concurrently discuss of ecological restration in Sanjiangyuan region. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26(1): 1–21.
尚占环, 董全民, 施建军, 等. 青藏高原“黑土滩”退化草地及其生态恢复近10年研究进展—兼论三江源生态恢复问题. *草地学报*, 2018, 26(1): 1–21.

- [12] Wosten J H M, Pachepsky Y A, Rawls W J, *et al.* Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology*, 2001, 251(3/4): 123–150.
- [13] Zhou B R, Han B H, Xiao H B, *et al.* Study on estimating diurnal evapotranspiration model of alpine marsh meadow in Three-river Headwater Region. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27(4): 928–937.
周秉荣, 韩炳宏, 肖宏斌, 等. 三江源区高寒沼泽草甸日蒸散估算模型研究. *草地学报*, 2019, 27(4): 928–937.
- [14] Sun Y, Yang Y S, He Q, *et al.* Responses of soil water conservation function and soil physicochemical properties to a range of degradation conditions in alpine meadows of the Three River Headwater Region. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(6): 16–29.
孙玉, 杨永胜, 何琦, 等. 三江源高寒草甸水源涵养功能及土壤理化性质对退化程度的响应. *草业学报*, 2023, 32(6): 16–29.
- [15] Dai L C, Yuan Y M, Guo X W, *et al.* Soil water retention in alpine meadows under different degradation stages on the northeastern Qinghai–Tibet Plateau. *Journal of Hydrology*, 2020, 590: 125397.
- [16] Yi X S, Li G S, Yin Y Y, *et al.* The impacts of grassland vegetation degradation on soil hydrological and ecological effects in the source region of the Yellow River—a case study in Junmunchang region of Maqin Country. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, 13: 967–981.
- [17] Yang Y S, Zhang L, Wei Y X, *et al.* Effects of degradation degree on soil physicochemical properties and soil water-holding capacity in the Zeku alpine meadow in the headwater region of Three Rivers in China. *Chinese Journal of Grassland*, 2017, 39(5): 54–61.
杨永胜, 张莉, 未亚西, 等. 退化程度对三江源泽库高寒草甸土壤理化性质及持水能力的影响. *中国草地学报*, 2017, 39(5): 54–61.
- [18] Pan T, Hou S, Wu S H, *et al.* Variation of soil hydraulic properties with alpine grassland degradation in the eastern Tibetan Plateau. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(4): 2249–2261.
- [19] Zeng C, Zhang F, Wang Q J, *et al.* Impact of alpine meadow degradation on soil hydraulic properties over the Qinghai–Tibetan Plateau. *Journal of Hydrology*, 2013, 478: 148–156.
- [20] Shang Z H, Feng Q S, Wu G L, *et al.* Grasslandification has significant impacts on soil carbon, nitrogen and phosphorus of alpine wetlands on the Tibetan Plateau. *Ecological Engineering*, 2013, 58: 170–179.
- [21] Yang S H, Li Y N, Pu J Y, *et al.* Investigation of the plant community and soil environmental factors of three alpine vegetation types. *Acta Agrestia Sinica*, 2006, 26(1): 77–83.
杨时海, 李英年, 蒲继延, 等. 三种高寒草甸植被类型植物群落结构及其土壤环境因子研究. *草地学报*, 2006, 26(1): 77–83.
- [22] Hu X Q, Wang X L, Liu H, *et al.* Effects of different restoration measures on plant communities and soil nutrients in alpine mining areas. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(4): 1218–1227.
胡晓晴, 王晓丽, 刘和, 等. 不同恢复措施对高寒矿区植物群落与土壤养分的影响. *草地学报*, 2025, 33(4): 1218–1227.
- [23] Adihaze, Chang T, Su H Y, *et al.* Effects of monoculture and mixed-sown grasses on soil physicochemical properties and microbial biomass. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(7): 2072–2080.
阿的哈则, 常涛, 苏洪烨, 等. 单播和混播禾草对土壤理化性质和微生物生物量的影响. *草地学报*, 2024, 32(7): 2072–2080.
- [24] Zheng S K, Xia F, Wei W, *et al.* Effects of artificial restoration and simulated warming on soil aggregate stability and nutrient distribution in alpine grassland. *Grassland and Turf*, 2025, 45(2): 32–42.
郑晒坤, 夏菲, 魏巍, 等. 人工修复和模拟增温对高寒草地土壤团聚体稳定性及其养分分布的影响. *草原与草坪*, 2025, 45(2): 32–42.
- [25] Lin C Y, Li X L, Zhang J, *et al.* Effects of degradation succession of alpine wetland on soil organic carbon and total nitrogen in the Yellow River source zone, west China. *Journal of Mountain Science*, 2021, 18(3): 694–702.
- [26] Sun J J, Wang P B, Wang H B, *et al.* Changes in plant communities, soil characteristics, and microbial communities in alpine meadows degraded to different degrees by pika on the Qinghai–Tibetan Plateau. *Global Ecology and Conservation*, 2021, 27: e01621.
- [27] Wang G X, Wang Y B, Li Y S, *et al.* Influences of alpine ecosystem responses to climatic change on soil properties on the Qinghai–Tibet Plateau, China. *Catena*, 2007, 70(3): 506–514.
- [28] Huang Q, Ding M J, Chen L W, *et al.* Variations of moisture in surface soil of alpine meadow with different degradation degrees in the Three River Source Region. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(1): 189–195.

- 黄倩, 丁明军, 陈利文, 等. 三江源区不同退化程度高寒草甸表土层的土壤水分变化特征. 水土保持学报, 2022, 36(1): 189–195.
- [29] Wang Q J. Technology rules for restoration of light and middle degraded grassland in alpine meadow. Xining: Qinghai Provincial Administration for Market Regulation, 2006.
王启基. 高寒草甸中、轻度退化草地植被恢复技术规程. 西宁: 青海省质量技术监督局, 2006.
- [30] Bao S D. Soil agrochemical analysis (The Third Edition). Beijing: China Agriculture Press, 2000.
鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [31] Yin X, Li D M, Li Y, *et al.* Effects of shrub encroachment on soil hydraulic properties in alpine meadow. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(5): 121–129.
尹霞, 李冬梅, 李易, 等. 灌丛化对高寒草甸土壤水力性质的影响. 水土保持学报, 2022, 36(5): 121–129.
- [32] Li S Y, Yuan Y Y, Zhang C C, *et al.* Response characteristics of soil saturated hydraulic conductivity after returning orchard to farmland on the loess plateau. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(1): 66–72.
李舒怡, 袁遥遥, 张晨晨, 等. 黄土塬区土壤饱和导水率对果园还耕的响应特征. 水土保持学报, 2025, 39(1): 66–72.
- [33] Gardner W R, Hillel D, Benyamini Y. Post-irrigation movement of soil water: 1. redistribution. Water Resources Research, 1971, 7(3): 753–760.
- [34] Zha X C, Tang K L. Soil erosion and changes of soil properties in loess hilly woodland. Acta Geographica Sinica, 2003, 53(3): 464–469.
查小春, 唐克丽. 黄土丘陵林地土壤侵蚀与土壤性质变化. 地理学报, 2003, 53(3): 464–469.
- [35] Alegre J C, Cassel D K. Dynamics of soil physical properties under alternative systems to slash-and-burn. Agriculture, Ecosystems & Environment, 1996, 58(1): 39–48.
- [36] Fu T G, Chen H S, Zhang W, *et al.* Vertical distribution of soil saturated hydraulic conductivity and its influencing factors in a small Karst catchment in southwest China. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, 187(3): 92.
- [37] Hallema D W, Lafond J A, Periard Y, *et al.* Long-term effects of peatland cultivation on soil physical and hydraulic properties: Case study in Canada. Vadose Zone Journal, 2015, 14(6): 1–12.
- [38] Gao Q Z, Wan Y F, Xu H M, *et al.* Alpine grassland degradation index and its response to recent climate variability in Northern Tibet, China. Quaternary International, 2010, 226(1/2): 143–150.
- [39] Zhang F W, Li H Q, Yi L B, *et al.* Spatial response of topsoil organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus content of alpine meadows to grassland degradation in the Sanjiangyuan National Park. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(14): 5586–5592.
张法伟, 李红琴, 仪律北, 等. 草地退化对三江源国家公园高寒草甸表层土壤有机碳、全氮、全磷的空间驱动. 生态学报, 2022, 42(14): 5586–5592.
- [40] Li W, Wang J L, Zhang X B, *et al.* Effect of degradation and rebuilding of artificial grasslands on soil respiration and carbon and nitrogen pools on an alpine meadow of the Qinghai–Tibetan Plateau. Ecological Engineering, 2018, 111: 134–142.
- [41] Niu B, Zhang L F, Ma R R, *et al.* Study of microbial biomass and enzymatic activity on the alpine meadow. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis, 2016, 49(4): 53–60.
牛犇, 张立峰, 马荣荣, 等. 高寒草甸土壤微生物量及酶活性的研究. 南开大学学报(自然科学版), 2016, 49(4): 53–60.
- [42] Zhan T Y, Hou G, Liu M, *et al.* Different characteristics of vegetation and soil properties along degraded gradients of alpine grasslands in the Qinghai–Tibet Plateau. Pratacultural Science, 2019, 36(4): 1010–1021.
詹天宇, 侯阁, 刘苗, 等. 青藏高原不同退化梯度高寒草地植被与土壤属性分异特征. 草业科学, 2019, 36(4): 1010–1021.
- [43] Su X K, Wu Y, Dong S K, *et al.* Effects of grassland degradation and re-vegetation on carbon and nitrogen storage in the soils of the Headwater Area Nature Reserve on the Qinghai–Tibetan Plateau, China. Journal of Mountain Science, 2015, 12(3): 582–591.
- [44] Qimanguli·Palati, Liu D, Mao J, *et al.* Contents and eco-stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in alpine grasslands with different degradation degrees. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(6): 1612–1620.
帕拉提其曼古丽, 刘丹, 毛军, 等. 不同退化程度高寒草地土壤碳氮磷含量及生态化学计量特征. 生态学杂志, 2024, 43(6): 1612–1620.
- [45] Xu C, Zhang L B, Du J Q, *et al.* Impact of alpine meadow degradation on soil water conservation in the source region of three rivers. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(8): 2388–2399.

- 徐翠, 张林波, 杜加强, 等. 三江源区高寒草甸退化对土壤水源涵养功能的影响. 生态学报, 2013, 33(8): 2388—2399.
- [46] Ge X G, Huang Z L, Cheng R M, *et al.* Effects of litterfall and root input on soil physical and chemical properties in *Pinus massoniana* plantations in Three Gorges Reservoir Area. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(12): 3301—3308.
葛晓改, 黄志霖, 程瑞梅, 等. 三峡库区马尾松人工林凋落物和根系输入对土壤理化性质的影响. 应用生态学报, 2012, 23(12): 3301—3308.
- [47] Plante P M, Rivest D, Vézina A, *et al.* Root distribution of different mature tree species growing on contrasting textured soils in temperate windbreaks. Plant and Soil, 2014, 380(1/2): 429—439.
- [48] Li C Y, Liang Z H, Li Z M, *et al.* Plant community characteristics and soil characteristics of degraded alpine meadows in the Beilu River Basin of the Yangtze River source area. Ecology and Environmental Sciences, 2024, 33(7): 1063—1071.
李成阳, 梁志辉, 李臻明, 等. 长江源区北麓河流域退化高寒草甸植物群落特征和土壤特性. 生态环境学报, 2024, 33(7): 1063—1071.
- [49] Wen J, Wang Y B, Gao Z Y, *et al.* Soil hydrological characteristics of the degrading meadow in permafrost in the Beiluhe River basin. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(4): 929—937.
文晶, 王一博, 高泽永, 等. 北麓河流域多年冻土区退化草甸的土壤水文特征分析. 冰川冻土, 2013, 35(4): 929—937.
- [50] Liu X, Cui N J, Tan F C, *et al.* The soil water holding capacity and its indicative effect on soil organic carbon of *Cryptomeria japonica* plantations in the rainy area of west China. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2023, 29(3): 670—679.
刘宣, 崔宁洁, 谭飞川, 等. 华西雨屏区柳杉人工林土壤持水能力及其对土壤有机碳的指示作用. 应用与环境生物学报, 2023, 29(3): 670—679.
- [51] Li J, Du Y G, Zhang F W, *et al.* Impact of matic epipedon on soil water conservation in alpine meadows. Acta Agrestia Sinica, 2012, 20(5): 836—841.
李婧, 杜岩功, 张法伟, 等. 草毡表层演化对高寒草甸水源涵养功能的影响. 草地学报, 2012, 20(5): 836—841.
- [52] Wang Y B, Wang G X, Wu Q B, *et al.* The impact of vegetation degeneration on hydrology features of alpine soil. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(5): 989—998.
王一博, 王根绪, 吴青柏, 等. 植被退化对高寒土壤水文特征的影响. 冰川冻土, 2010, 32(5): 989—998.
- [53] Zhang Y H, Zhang L, Zhang X J, *et al.* Effects of degradation degree on plant communities and soil water holding capacity of Maqin alpine meadow. Pratacultural Science, 2022, 39(2): 235—246.
张宇恒, 张莉, 张秀娟, 等. 退化程度对玛沁高寒草甸植物群落及土壤持水能力的影响. 草业科学, 2022, 39(2): 235—246.
- [54] Wei Q, Wang F, Chen W Y, *et al.* Soil physical characteristics on different degraded alpine grasslands in Maqu County in upper Yellow River. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(5): 16—21.
魏强, 王芳, 陈文业, 等. 黄河上游玛曲不同退化程度高寒草地土壤物理特性研究. 水土保持通报, 2010, 30(5): 16—21.
- [55] Fan B, Lin L, Cao G M, *et al.* Relationship between plant roots and physical soil properties in alpine meadows at different degradation stages. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(7): 2300—2309.
樊博, 林丽, 曹广民, 等. 不同演替状态下高寒草甸土壤物理性质与植物根系的相互关系. 生态学报, 2020, 40(7): 2300—2309.
- [56] Li J H, Yang G J, Wang S P. Vegetation and soil characteristics of degraded alpine meadows on the Qinghai—Tibet Plateau, China: A review. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(6): 2109—2118.
李军豪, 杨国靖, 王少平. 青藏高原区退化高寒草甸植被和土壤特征. 应用生态学报, 2020, 31(6): 2109—2118.
- [57] Yue D L, Li G R, Li J F, *et al.* Soil wind erosion and nutrient loss in typical rodent mounds in a degraded alpine grassland in the Yellow River source zone. Arid Zone Research, 2024, 41(4): 603—617.
越大林, 李国荣, 李进芳, 等. 黄河源高寒退化草地典型鼠丘土壤风蚀及养分流失规律研究. 干旱区研究, 2024, 41(4): 603—617.