Hans Journal of Soil Science 土壤科学, 2026, 14(4), 279-292
Published Online October 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/hjss
https://doi.org/10.12677/hjss.2026.144027

Hans汉斯

青海祁连山国家公园沼泽湿地退化过程研究

杨红珍[1]，杨昊虹[2*]，张乐乐[1]，于红妍[3]，毛旭锋[1]，王贤颖[3]，苟丽娟[4]

[1]青海师范大学地理科学学院，青海省自然地理与环境过程重点实验室，青海 西宁
[2]青海师范大学生命科学学院，青藏高原地表过程与生态保育教育部重点实验室，青海 西宁
[3]祁连山国家公园青海省管理局，青海 西宁
[4]青海大开生态科技有限公司，青海 西宁

收稿日期：2026年9月23日；录用日期：2026年10月21日；发布日期：2026年10月29日

摘 要

本研究选取青海祁连山国家公园内不同退化程度(未退化、轻度退化、中度退化和重度退化)的沼泽湿地作为研究对象，通过野外实地调查与室内分析相结合的方法，系统测定并分析不同退化梯度下关键植被参数和土壤参数的变化特征。得到的结果表明，未退化沼泽湿地的植物群落主要以藏嵩草(*Kobresia xchoenoides*)、华扁穗草(*Blysmus sinocompressus*)等为优势种，轻度退化阶段线叶嵩草(*Kobresia capillifolia*)、矮嵩草(*Kobresia humilis*)等为优势种，中度退化阶段矮嵩草(*Kobresia humilis*)、委陵菜(*Potentilla chinensis* Ser)等为优势种，重度退化阶段主要以西伯利亚蓼(*Knorringia sibirica*)、珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)等为优势种。从未退化至重度退化，莎草科的优势种地位逐渐被削弱，而菊科、蓼科的种类逐渐增多，积水含量逐渐减少，鼠洞密度逐渐增多。随着沼泽湿地退化程度的加剧，植物高度、植被盖度、地上生物量和地下生物量均呈现出减小趋势；土壤含水量、有机质含量、全氮、全磷含量整体呈现出减小趋势，全钾以及深层土壤温度则呈现出增加趋势。

关键词

祁连山国家公园，沼泽湿地，退化，植被，土壤

Study on the Degradation Process of Marsh Wetlands in Qinghai Qilian Mountain National Park

Hongzhen Yang[1], Haohong Yang[2*], Lele Zhang[1], Hongyan Yu[3], Xufeng Mao[1], Xianying Wang[3], Lijuan Gou[4]

[1]Qinghai Provincial Key Laboratory of Physical Geography and Environmental Process, School of Geographical Sciences, Qinghai Normal University, Xining Qinghai

[*]通讯作者。

文章引用: 杨红珍, 杨昊虹, 张乐乐, 于红妍, 毛旭锋, 王贤颖, 苟丽娟. 青海祁连山国家公园沼泽湿地退化过程研究[J]. 土壤科学, 2026, 14(4): 279-292. DOI: 10.12677/hjss.2026.144027

[2]Key Laboratory of Qinghai-Xizang Plateau Land Surface Processes and Ecological Conservation, Ministry of Education, School of Life Sciences, Qinghai Normal University, Xining Qinghai
[3]Qinghai Provincial Administration Bureau of Qilian Mountain National Park, Xining Qinghai
[4]Qinghai Dakai Ecological Technology Co., Ltd., Xining Qinghai

Received: September 23, 2026; accepted: October 21, 2026; published: October 29, 2026

Abstract

In this study, marsh wetlands with different degradation degrees (non-degraded, lightly degraded, moderately degraded and heavily degraded) in Qinghai Qilian Mountain National Park were selected as the research objects, and the variation characteristics of key vegetation and soil parameters along the degradation gradient were systematically measured and analyzed through a combination of field investigation and laboratory analysis. The results showed that the plant community of the non-degraded marsh wetland was dominated by *Kobresia xchoenoides* and *Blysmus sinocompressus*; the lightly degraded stage was dominated by *Kobresia capillifolia* and *Kobresia humilis*; the moderately degraded stage was dominated by *Kobresia humilis* and *Potentilla chinensis* Ser; and the heavily degraded stage was mainly dominated by *Knorringia sibirica* and *Polygonum viviparum*. From non-degraded to heavily degraded wetlands, the dominance of Cyperaceae species was gradually weakened, while the species number of Asteraceae and Polygonaceae gradually increased; surface water accumulation gradually decreased, whereas rodent burrow density gradually increased. With the intensification of marsh wetland degradation, plant height, vegetation coverage, aboveground biomass and belowground biomass all showed decreasing trends; soil water content, soil organic matter content, total nitrogen and total phosphorus contents generally showed decreasing trends, while total potassium content and deep soil temperature showed increasing trends.

Keywords

Qilian Mountain National Park, Marsh Wetland, Degradation, Vegetation, Soil

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

湿地，被誉为“地球之肾”，是处于水陆交错带的独特生态系统，具有极高的生物多样性保护、水资源调蓄、气候调节、碳汇以及净化环境等关键的生态功能与服务价值[1] [2]。在全球尺度上，湿地虽然仅覆盖了约 6%的陆地表面，却储存了全球近三分之一的土壤有机碳，是极其重要且高效的碳汇[3]。同时，湿地也为众多珍稀濒危动植物提供了不可替代的栖息地，维系着区域乃至全球的生态平衡[4]。然而，近几十年来，在全球气候变化与日益加剧的人类活动双重胁迫下，全球湿地正面临着前所未有的退化与丧失风险[5] [6]。据估算，自 20 世纪初以来，全球已有超过 50%的天然湿地因排水造田、基础设施建设、水资源过度开采、污染及气候变化等因素而退化或消失，其退化速度远超同期的森林等其他生态系统，引发了严重的生态环境危机，如生物多样性锐减、温室气体排放增加、区域水文紊乱及生态服务功能衰退等[7] [8]。

高寒沼泽湿地作为湿地家族中一种特殊的类型，主要分布在高海拔、低温的独特生境中，如青藏高原及其周边山脉[9]。这些生态系统因其严酷的环境条件和脆弱的生态阈值，对全球变化的响应尤为敏感和剧烈，被视为全球变化的“预警区”和“放大器”[10] [11]。青海祁连山国家公园位于青藏高原东北缘，是我国重要的生态安全屏障和水源涵养区，其境内分布着广袤而典型的高寒沼泽湿地[12] [13]。这些湿地不仅是黑河、疏勒河、石羊河等内陆河的重要发源地和水源补给区，维系着河西走廊乃至我国西北地区的生态安全与水资源安全，同时也是高寒生物多样性的热点区域和重要的碳库，其生态地位至关重要[14] [15]。

然而，受全球气候持续变暖(导致多年冻土退化、蒸发加剧)以及局部地区过度放牧、旅游活动等人类活动的综合影响，祁连山地区的湿地生态系统正面临着显著的退化威胁[16] [17]。已有观测和研究表明，该区域部分沼泽湿地出现了地下水位下降、湿地面积萎缩、植被群落逆向演替、土壤理化性质恶化以及碳汇功能减弱等一系列退化迹象[18] [19]。湿地的退化是一个复杂的生态过程，通常伴随着植被特征(如群落结构、物种多样性、生物量、盖度)和土壤属性(如土壤水分、容重、养分含量、有机碳库)的协同变化，这些参数是表征湿地健康状况和退化程度最直接、最敏感的指标[20] [21]。植被退化会导致地表覆盖减少，加剧土壤蒸发和水土流失；而土壤退化，特别是土壤有机质的分解加速和结构破坏，又会反过来制约植被的恢复与生长，形成恶性循环，最终导致湿地生态系统的结构和功能发生不可逆的损害[22] [23]。

目前，虽然已有研究关注祁连山地区的生态环境变化，但针对国家公园范围内沼泽湿地系统性的退化过程研究仍相对薄弱。多数研究或侧重于单一因素(如气候或放牧)的影响分析，或局限于小范围的定性描述，缺乏对不同退化程度下植被与土壤参数响应规律的定量化、对比性研究[24] [25]。明确不同退化阶段(如未退化、轻度、中度、重度退化)湿地生态系统的植被与土壤特征差异，是准确诊断湿地健康状况、揭示退化驱动机制、预测未来演变趋势以及制定科学有效恢复措施的基础和前提[26] [27]。

基于此，本研究选取青海祁连山国家公园内不同退化程度(未退化、轻度退化、中度退化和重度退化)的沼泽湿地作为研究对象，通过野外实地调查与室内分析相结合的方法，系统测定并分析不同退化梯度下关键植被参数(如群落组成、多样性指数、地上/地下生物量、植被盖度等)和土壤参数(如土壤含水量、容重、pH 值、有机碳、全氮、全磷等)的变化特征。本研究旨在：(1) 阐明沼泽湿地退化过程中植被与土壤参数的演变规律；(2) 揭示植被特征与土壤性质在湿地退化过程中的耦合关系；(3) 评估不同退化程度对湿地生态系统结构与功能的影响，为祁连山国家公园湿地的保护、修复与管理提供坚实的科学依据和数据支撑。

2. 研究区介绍及研究方法

2.1. 研究区介绍

祁连山国家公园位于青海省东北部，地处甘肃、青海两省的交界地带，是祁连山国家公园的重要组成部分，总面积达 1.58 万平方公里(图 1)。国家公园分区包含核心保护区和一般控制区的空间范围，其中核心保护区 0.94 万平方公里，占国家公园总面积的 59.5%；一般控制区 0.64 万平方公里，占国家公园总面积的 40.5%。属高原大陆性气候区，具有显著的高寒特征。根据最新气象监测数据，与近十年相比，该区域年平均气温偏高，年降水量略多，年日照时数略少。

2.2. 研究方法

2.2.1. 样地选择

根据以往在祁连山国家公园调研的结果，沼泽湿地主要分布在黑河和疏勒河上游相对开阔的河谷和河滩地带，因此本研究沼泽湿地样地的布设主要选择在这些区域。根据项目的要求，在黑河和疏勒河上游设置不同退化程度沼泽湿地监测样地 18 个，每块样地设置 3 个重复，沼泽湿地调查时间选择每年植被生长旺季(7~8 月份)。

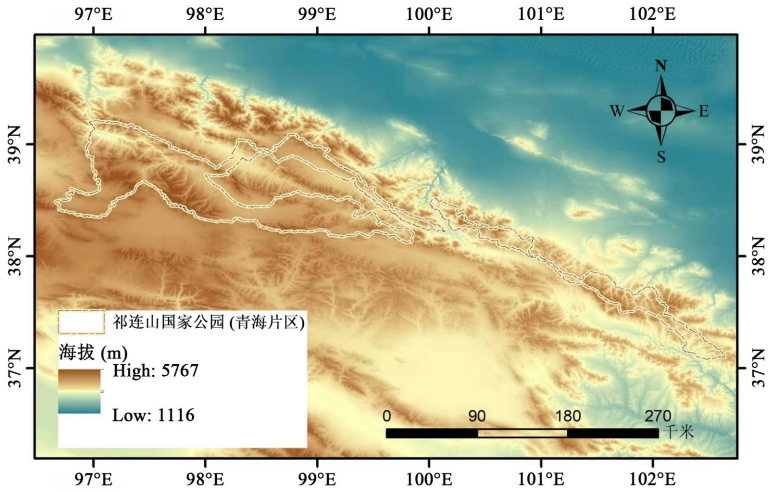

Figure 1. Location map of Qilian Mountain National Park (Qinghai section)
图 1. 祁连山国家公园(青海片区)地理位置图

沼泽湿地退化等级的划分参照《天然草地退化、沙化、盐渍化的分级指标》(GB 19377-2003)[1]，并借鉴青藏高原高寒湿地退化分级的相关研究成果，以未退化沼泽湿地作为对照，综合植被盖度下降幅度、优势植物种更替、地表积水状况和鼠洞密度四类可量化指标，将研究区沼泽湿地划分为未退化、轻度退化、中度退化和重度退化四个等级，具体划分标准见表 1。

Table 1. Classification criteria for degradation levels of marsh wetlands
表 1. 沼泽湿地退化等级划分标准

退化程度	植被盖度下降幅度	优势种更替特征	地表积水状况	鼠洞密度(个/m^2)
未退化	无下降(对照)	莎草科嵩草属植物占绝对优势	常年积水，积水较多	0~2
轻度退化	<30%	嵩草属仍占优势，火绒草等杂类草开始侵入	积水较少，呈季节性积水	2~10
中度退化	30%~60%	嵩草属与委陵菜等杂类草共占优势	积水很少，出现大量干化斑块	10~24
重度退化	>60%	蓼科植物占优势，莎草科优势地位丧失	无积水，地表斑块性裸露并有沙化	>24

2.2.2. 植被调查方法

沼泽湿地样地和样方设置参考国家林业和草原局 2023 年发布的《全国林草生态综合监测技术规程（试行）》[2]。在样地中心点设置固定标桩，标桩大小、高度根据样地实际情况埋设，以能够复位为准。以样地中心点为圆心、40 m 为半径设置面积为 0.5 hm^2 的圆形样地。植物样方的大小由植被类型确定，乔木样方为 1 个面积为 0.06~0.08 hm^2 之间的方形/长方形/圆形(按照第九次全国森林资源清查各省固定样地的大小和形状)；灌木样方一般情况下为 100 m^2 (10 m × 10 m)，当灌木冠幅较小且分布均匀时，可缩小至 25 m^2 (5 m × 5 m)；草本植物为 3 个 1 m^2 小样方(1 m × 1 m)。根据以往的调研结果，祁连山国家公园(青海片区)沼泽湿地区域主要为草本植物，因此样方全部设置为 1 m^2 小样方。植被监测内容主要包括湿

[1]https://openstd.samr.gov.cn/bzgk/std/newGbInfo?hcno=5F1960D0692A36C09136E04E6DE60B4E
[2]https://www.guoturen.com/wenku-13331.html

地植被种数、高度、植被总盖度、分层植被盖度、优势植物种、植物种类、生长状况和植被地上、地下生物量，详细监测方法见表 2。

Table 2. Monitoring methods for key indicators of marsh wetland vegetation
表 2. 沼泽湿地植被主要指标监测方法

编号	监测指标	监测方法
1	植物种类和种数	样方中物种类型和对应的数量，通过对样方中的植被直接调查记录得到。
2	高度	随机选择 10 株进行测量后取平均值，单位 cm。
3	植被总盖度	湿地生态系统的植被覆盖度采用目测法和照相法相结合的方式观测。利用较高像素相机获取植被覆盖的数码照片，重复拍摄 2~3 次，最后分别计算每张相片植被覆盖度，取其平均值作为样方植被覆盖度。对于相机不易识别的区域，采用目测法观测植被覆盖度。
4	分种植被盖度	样方中每种植物垂直投影覆盖面积占样方面积的比例。
5	优势植物种	在各监测样地内随机设置 3 个大小为 1.0 m × 1.0 m 的样方，记录样方内出现的植物中名称及数量，确定监测样地内的主要优势种植物名称及其它伴生物种的数量。
6	地上生物量	植物群落生物量的测定与植物种类组成的调查随同进行，采用样方收获法测定。针对沼泽湿地植物生物量野外观测选择植物生长高峰期时进行，主要方法是将样方内植物地面以上所有绿色部分用剪刀齐地面剪下，不分物种按样方分别装进信封袋，做好标记。对采集的样本进行称量鲜重后，65℃烘干至恒重称量干重，将多个样方内干重值求平均，得到单位面积(1 m^2)的生物量。
7	地下生物量	地下生物量的获取采用挖土块法，土块面积大小为 20 cm × 20 cm，采集深度为 40 cm。野外采集的地下植物根系土样带回室内用细筛(孔径 1 mm，泰勒标准 16 目)筛去土，再用细纱布包好根系，用清水洗净，并拣出石块和其他杂物在 65℃恒温箱烘干 12 h 后称重。以上生物量最后都换算成单位面积地上干物质量(g/m^2)。

2.2.3. 土壤调查方法

土壤取样与地下生物量调查随同进行，即在测定过地下生物量的样方(100 cm × 100 cm)，在土壤剖面用 100 cm^3 的土钻分层钻取 3 个土壤样品，即 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm 的土壤样品，标记、称重、记录后用于土壤测定。土壤监测指标包括土壤理化性质和土壤肥力特征，主要包括土壤酸碱度(pH 值)、含水量、温度、土壤性状、有机质(SOM)、全氮(N)、全磷(P)、全钾(K)、有机碳(SOC)等指标。沼泽湿地土壤采样和保存严格按照《土壤环境监测技术规范规定规范》(HJ 166-2026)[3]执行，室内检测由具有 CMA 资质的第三方检测公司，参照《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准（试行）》(GB 15618-2018)[4]等规定的技术方法完成，确保数据质量。

3. 结果与讨论

3.1. 沼泽湿地退化的植被群落演替特征

3.1.1. 植物群落物种组成

沿着不同退化阶段，植物群落的物种组成存在差异(表 3)。未退化沼泽湿地的植物群落主要以藏嵩草(*Kobresia xchoenoides*)、华扁穗草(*Blysmus sinocompressus*)等为优势种，轻度退化阶段线叶嵩草(*Kobresia*

[3]https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/jcffbz/202602/t20260228_1145106.shtml
[4]https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/trhj/201807/W020190626595212456114.pdf

capillifolia)、矮嵩草(*Kobresia humilis*)等为优势种，中度退化阶段矮嵩草(*Kobresia humilis*)、委陵菜(*Potentilla chinensis* Ser)等为优势种，重度退化阶段主要以西伯利亚蓼(*Knorringia sibirica*)、珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)等为优势种。从未退化至重度退化，莎草科的优势种地位逐渐被削弱，而菊科、蓼科的种类逐渐增多，积水含量逐渐减少，鼠洞密度逐渐增多。

从演替方向看，莎草科嵩草属优势地位削弱、菊科与蓼科杂类草增多的群落更替路径，与赵成章等[16]在祁连山北坡高寒草地退化序列中的观测结果一致，也与赵志平等[25]对青藏高原高寒草地退化过程的报道相印证，表明“嵩草属衰退–杂类草侵入”是高寒湿地与草甸退化过程中群落演替的普遍模式；同时本研究进一步发现，植被更替与地表积水消失、鼠洞密度激增(由未退化湿地的每平方米 0~2 个增至中度退化湿地的 10~24 个)同步发生，补充了小型啮齿动物扰动参与驱动高寒沼泽湿地群落逆向演替的实证依据。

Table 3. Basic characteristics of vegetation sample plots in marsh wetlands with varying degrees of degradation
表 3. 不同退化程度沼泽湿地植被样地的基本情况

退化程度	主要植物群落类型	基本情况
未退化	线叶嵩草(*Kobresia capillifolia*) + 华扁穗草(*Blysmus sinocompressus*) 线叶嵩草(*Kobresia capillifolia*) + 藏嵩草(*Kobresia xchoenoides*)	积水较多，植物种类较丰富，几乎无裸斑，鼠洞密度为每平方米 0~2 个
轻度退化	线叶嵩草(*Kobresia capillifolia*) + 矮嵩草(*Kobresia humilis*) 线叶嵩草(*Kobresia capillifolia*) + 火绒草(*Leontopodium nanum*)	积水较少，植物种类丰富，有少量干化斑块出现，鼠洞密度为每平方米 2~10 个
中度退化	矮嵩草(*Kobresia humilis*) + 委陵菜(*Potentilla chinensis Ser*) 矮嵩草(*Kobresia humilis*) + 线叶嵩草(*Kobresia capillifolia*)	积水很少，植物种类较少，出现大量干化斑块，鼠洞密度为每平方米 10~24 个
重度退化	矮嵩草(*Kobresia humilis*) + 西伯利亚蓼(*Knorringia sibirica*) 矮嵩草(*Kobresia humilis*) + 珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)	无积水，植被种类很少，地表出现斑块性裸露，土地出现沙化现象，鼠洞很多

3.1.2. 植物群落生长特征

不同退化程度下，植物生长特征存在显著差异(图 2)。随着沼泽湿地退化程度的加剧，植物高度呈现出不断降低的趋势，具体表现在重度退化程度下植物的高度显著低于未退化湿地($P < 0.05$)。植物盖度沿退化方向表现出逐渐减小的特征，中度和重度退化程度的植物盖度显著低于未退化状态。植物密度在未退化状态下最大，在重度退化时最小，具有随退化程度加剧而逐渐减小的特征。沼泽湿地退化使地上生物量的平均值、最大值和最小值均存在显著差异($P < 0.05$)，当沼泽湿地从未退化状态朝着重度退化方向演变时，植物地上生物量依次经历从 126.34、98.26、86.76、59.87 的变化。可见随沼泽湿地退化程度加剧地上生物量表现出逐渐减小的趋势。

3.1.3. 植物群落多样性特征

如图 3 显示了不同退化程度下的沼泽湿地植物群落多样性指数特征。不同退化程度对 Patrick 物种丰富度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数产生显著影响($P < 0.05$)，Patrick 物种丰富度指数具体表现为中度退化 > 轻度退化 > 未退化 > 重度退化，且重度退化显著低于其他退化湿地($P < 0.05$)，Shannon-Wiener 多样性指数具体表现为轻度退化 > 中度退化 > 未退化 > 重度退化，轻度退化和中度退化与未退化和重度退化之间存在显著差异($P < 0.05$)，不同的是湿地退化未对 Pielou 均匀度指数和 Simpson 优势度指数产生显著影响，但 Pielou 均匀度指数呈先增加后降低趋势，Simpson 优势度指数随退化程度增加呈降低趋势。

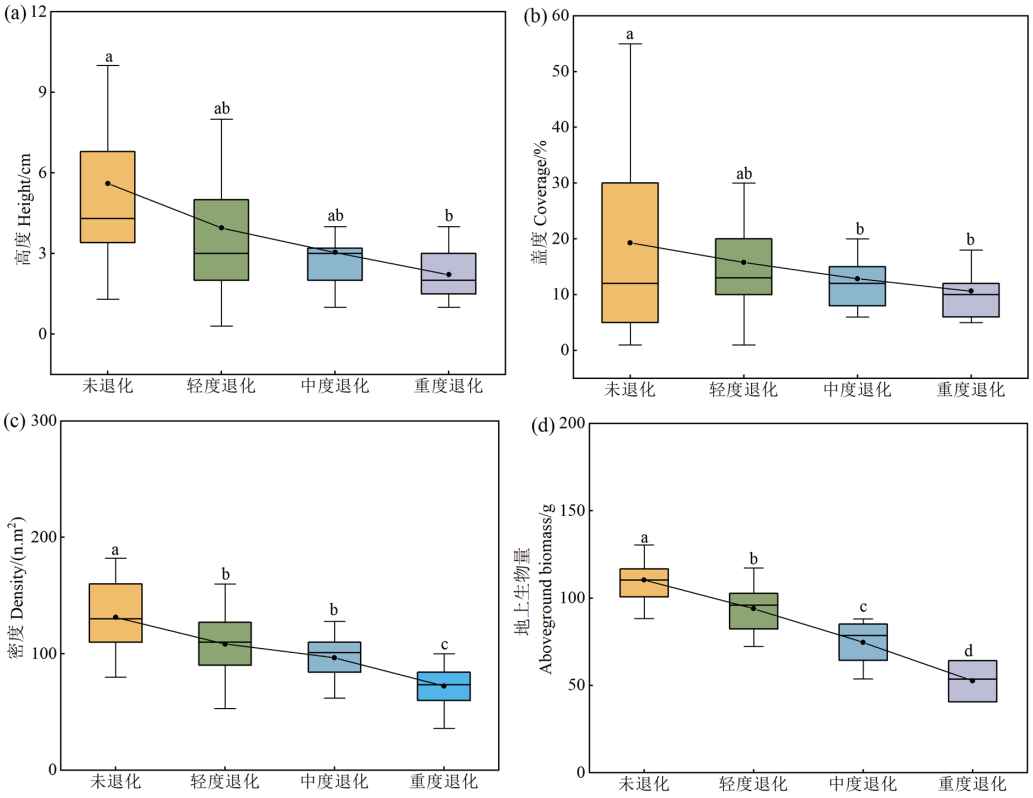

Figure 2. Growth characteristics of plant communities in degraded marsh wetlands
图 2. 退化沼泽湿地的植物群落生长特征

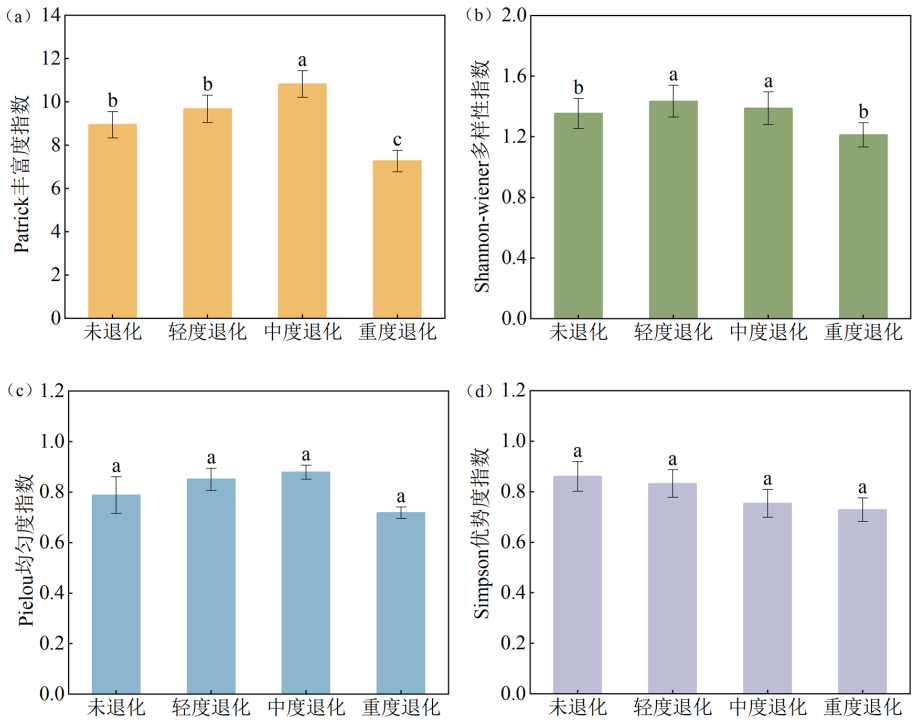

Figure 3. Characteristics of plant community diversity in degraded marsh wetlands
图 3. 退化沼泽湿地的植物群落多样性特征

值得注意的是，Patrick 物种丰富度指数与 Shannon-Wiener 多样性指数沿退化梯度均呈现先升高后降低的单峰型变化格局，这一模式与中度干扰假说(intermediate disturbance hypothesis, IDH)的预测相吻合[28]。该假说认为，中等强度的干扰可打破优势种对资源的垄断、释放生态位空间，使群落多样性达到峰值。本研究中，轻度至中度退化阶段，放牧践踏、鼠类挖掘等干扰削弱了藏嵩草、线叶嵩草等莎草科优势种的竞争地位，为火绒草、委陵菜等杂类草的侵入与共存创造了条件，群落丰富度与多样性随之升高；而当退化加剧至重度阶段时，生境旱化、沙化程度超出多数物种的耐受阈值，仅西伯利亚蓼、珠芽蓼等少数耐旱种类得以存续，多样性转而显著下降。这一结果表明，祁连山高寒沼泽湿地植物多样性对退化干扰的响应存在明显的临界区间，中度退化阶段可能是群落多样性维持与生态系统功能衰退之间的关键转折期，为中度干扰假说在高寒沼泽湿地生态系统中的适用性提供了新的实证支撑。

3.2. 沼泽湿地退化对土壤理化性质的影响

3.2.1. 不同退化程度下沼泽湿地的土壤含水率差异特征

图 4 显示了不同退化程度的沼泽湿地 0~30 cm 土层的土壤含水率。在四种退化类型中，0~10 cm 层的平均含水率从高到低依次为未退化沼泽湿地(43.27%)、轻度退化沼泽湿地(37.57%)、中度退化沼泽湿地(33.71%)、重度退化沼泽湿地(27.68%)；10~20 cm 层中依次为未退化沼泽湿地(42.93%)、轻度退化沼泽湿地(34.50%)、中度退化沼泽湿地(31.09%)、重度退化沼泽湿地(26.59%)；20~30 cm 层中依次为未退化沼泽湿地(37.76%)、轻度退化沼泽湿地(33.21%)、中度退化沼泽湿地(29.09%)、重度退化沼泽湿地(27.58%)。由此可见，土壤含水率随着沼泽湿地退化程度加深呈递减趋势，与未退化沼泽湿地相比，重度退化沼泽湿地 0~30 cm 土层的平均含水率下降了 33.96%，与此同时随着土层的加深，土壤含水率呈现下降的趋势(仅重度退化型湿地在 20~30 cm 较 10~20 cm 略有回升)，但不改变整体下降格局。总体而言，土壤含水率受水平尺度(退化程度)与垂直尺度(土层深度)双重控制，且存在显著交互，例如，随着退化程度加深土壤含水率整体降低，其中 10~20 cm 土层含水率对退化反应最为敏感；随深度加深含水率总体下降，但重度退化沼泽湿地含水率的剖面梯度几近消失，指示水位显著下移与持水结构的退化。

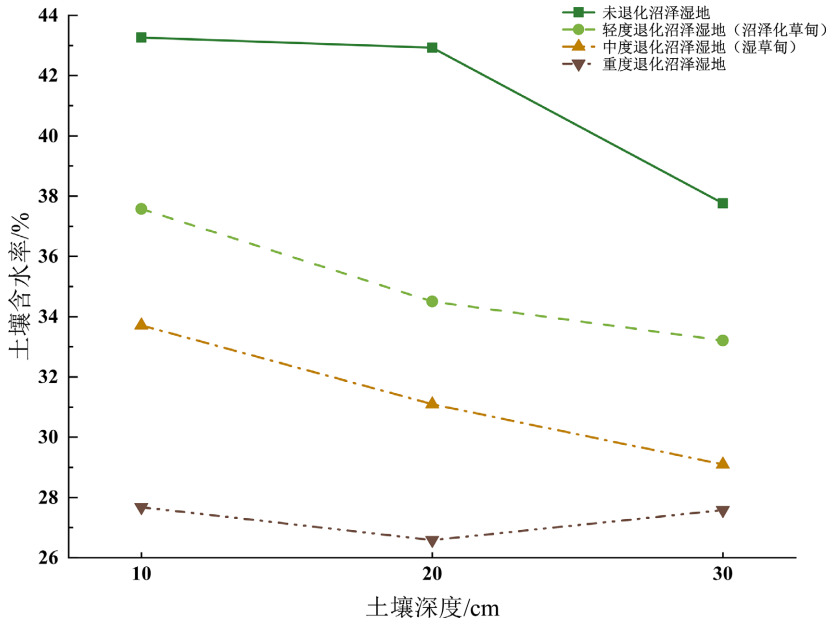

Figure 4. Soil water content (0~30 cm) of marsh wetlands with varying degrees of degradation
图 4. 不同退化程度的沼泽湿地土壤 0~30 cm 含水率

3.2.2. 不同退化程度下沼泽湿地的土壤温度差异特征

图 5 显示了不同退化程度的沼泽湿地在 0~30 cm 土层的温度，由图可知随着沼泽湿地退化程度的加剧以及土层深度的加深，土壤温度逐渐下降，其中以未退化沼泽湿地表现最为显著($P < 0.05$)，与 0~10 cm 土层相比，20~30 cm 土层的温度由 20.18℃降至 11.43℃，降幅为 43.35%，其余 3 种退化类型湿地的变化范围分别为 4.05℃、3.46℃以及 2.77℃，表明随着退化程度加深，0~30 cm 土层的温度垂向梯度显著减小，表明剖面由“表暖–深冷”的强梯度状态向近均温状态转变。此外，四种类型的沼泽湿地的土壤温度在表层土壤(0~10 cm)变化最为剧烈，由未退化沼泽湿地的 20.18℃降至重度退化沼泽湿地的 14.71℃，组间范围为 5.47℃，10~20 cm 及 20~30 cm 土层的组间范围分别为 2.26℃和 2.15℃。由此可见，土温受退化与深度双重控制并存在显著交互——未退化表现为“表暖深冷、梯度陡”，而退化使得中深层相对升温、剖面趋于均温；其温度分布格局与土层含水率剖面的扁平化走向趋于一致。

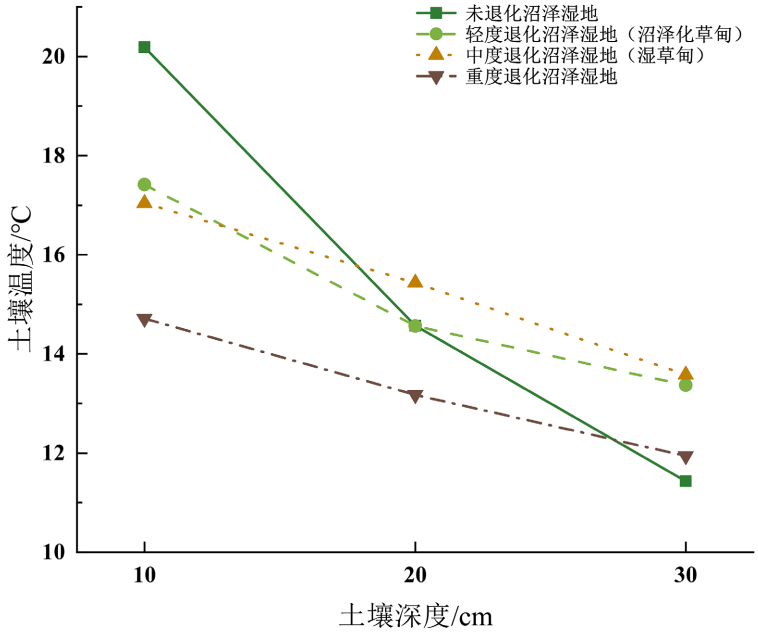

Figure 5. Soil temperature (0~30 cm) of marsh wetlands with varying degrees of degradation
图 5. 不同退化程度的沼泽湿地土壤 0~30 cm 温度

3.2.3. 不同退化程度下沼泽湿地的土壤有机质差异特征

图 6 显示了不同退化程度的沼泽湿地土壤 0~30 cm 有机质的变化趋势，由该图可知，随着沼泽湿地退化程度加剧，0~30 cm 的土层有机质平均含量由未退化沼泽湿地的 171.27 g/kg 下降至重度退化沼泽湿地的 29.36 g/kg，并且四种类型湿地随着土层加深，土壤有机质含量亦随之降低，其中以未退化沼泽湿地表现最为显著，由表层土壤的 202.87 g/kg 减少至 20~30 cm 土层的 110.12 g/kg，降幅为 45.71%。水平尺度来看，相对于未退化湿地区，轻度、中度以及重度退化湿地区在 10~20 cm 土层的降幅分别为 56.1%、80.0%以及 86.1%，大于表层与深层的相对降幅，表明中层土壤的有机质含量对退化程度表现最为敏感。前文研究表明湿地退化导致含水率下降、温度梯度变平、pH 中层出现“V”形低谷。这些趋势共同指向土壤通水透气性能增强使得有机质输入减少以及输出增加(好氧分解、风干氧化)并行发生，尤其在 10~20 cm 氧化带最活跃，因而最先、最大幅度地消耗 SOM。综上所述，SOM 对湿地退化与深度增加的双重响应清晰——水平尺度随退化显著降低，垂直尺度随深度递减；其中以 10~20 cm 表现最为敏感，而剖面梯度随退化趋缓表明泥炭层结构与碳库被持续削弱，这一格局与水位下移、通气增强及植被更替相一致。

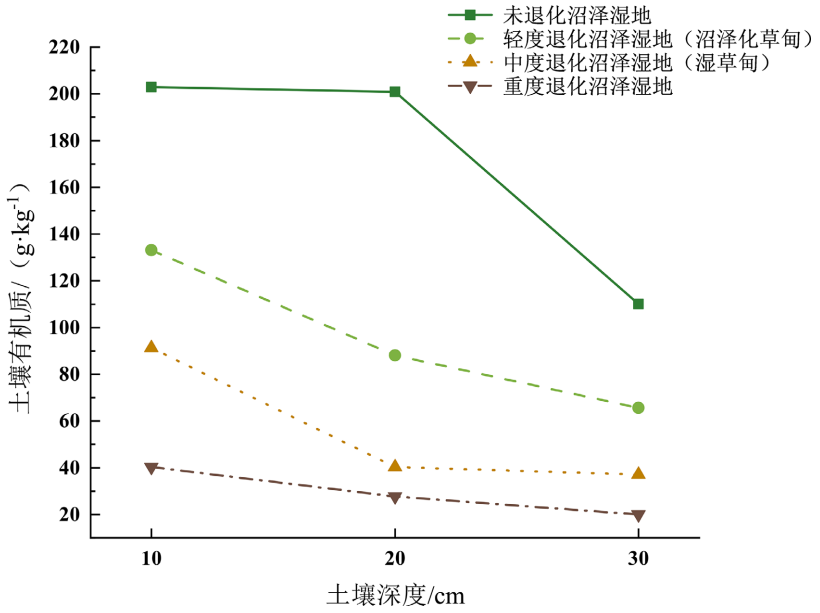

Figure 6. Soil organic matter content (0~30 cm) in marsh wetlands with varying degrees of degradation
图 6. 不同退化程度的沼泽湿地土壤 0~30 cm 有机质

3.2.4. 不同退化程度下沼泽湿地的土壤全氮、全磷、全钾的差异特征

图 7~9 显示了不同退化程度的沼泽湿地土壤 0~30 cm 的全氮、全磷、全钾含量，土壤中的全氮、全磷、全钾的合称在水土保持和土壤科学领域中被广泛称为肥料三要素。由图 6~8 可知，随着沼泽湿地退化程度加剧以及土层的加深，土壤 TN 含量逐渐降低，在表层土壤中，土壤 TN 由未退化湿地的 8.86 g/kg 降至重度退化的 2.03 g/kg，跨度为 6.83；在 10~20 cm 土层中，土壤 TN 由未退化湿地的 7.17 g/kg 降至重度退化的 1.41 g/kg，跨度为 5.76；在 20~30 cm 土层中，土壤 TN 由未退化湿地的 4.57 g/kg 降至重度退化的 1.13 g/kg，跨度为 3.44，表明退化越严重，剖面梯度越小。退化区普遍含水率低、温度梯度平、pH 偏碱，干燥与通气促进有机氮矿化与硝化，碱性环境又可能提高 NH_3挥发风险；同时较低含水量抑制了还原环境的形成，反硝化总体受限但瞬时峰值更易出现，这些均不利于土壤中 TN 含量的长期积累。总体而言，TN 对退化与深度呈显著双重响应——同一土层的 TN 随退化明显降低、同一退化程度内则随深度递减；其中 10~20 cm 最为敏感，而剖面梯度随退化趋缓，共同指向排水通气增强与有机质输入减少主导的氮库衰减过程。

图 8 显示了四种退化程度沼泽湿地土壤在 0~30 cm 土层全磷的变化趋势。结果表明，随着土层的加深，所有退化类型湿地的 TP 含量总体上呈现出下降的趋势，但不同退化类型的下降幅度与序列存在差异。在前 20cm 土层中，未退化沼泽湿地和轻度退化沼泽湿地的 TP 含量均高于中度和重度退化沼泽湿地，而到了深层土壤中，重度退化湿地的 TP 含量则出现了反超。表层土壤 TP 含量随退化单调下降，反映出有机质减少与表层输入衰减的直接效应；而在 20~30 cm 土层中，重度与中度退化湿地的 TP 含量分别较 10~20 cm 土层高了 1.15%和 4.15%，并且重度退化湿地的 TP 含量高于未退化湿地，表明在长期排水与通气增强的条件下，磷元素更易向剖面下部迁移并在中深层被固定；同时，重度退化区的 30 cm 处可能已暴露出磷含量较高的矿质层。因此，在水平和垂直尺度上，TP 对退化与深度的响应表现为表层显著下降、深层相对“抬升”，导致剖面逐渐均一化；这一分布格局与有机质衰减、水位下移及碱性环境下的矿物固定相一致，表明重度退化区在复湿或还原增强时可能存在内源 P 释放风险。

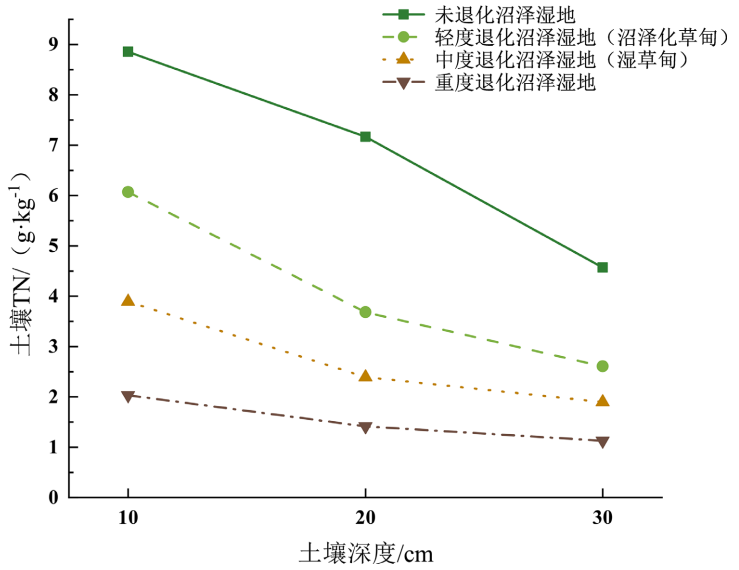

Figure 7. Total nitrogen content (0~30 cm) in marsh wetland soils with varying degrees of degradation
图 7. 不同退化程度的沼泽湿地土壤 0~30 cm 全氮含量

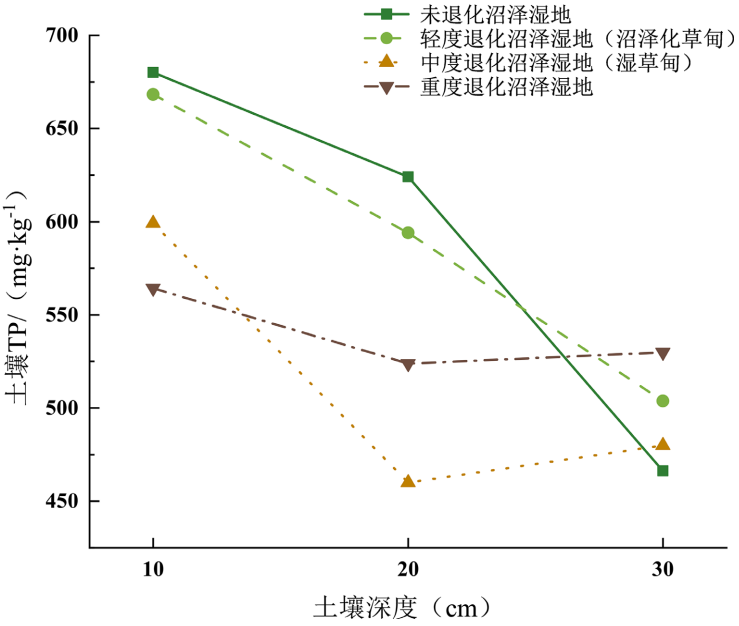

Figure 8. Total phosphorus content (0~30 cm) in marsh wetland soils with varying degrees of degradation
图 8. 不同退化程度的沼泽湿地土壤 0~30 cm 全磷含量

图 9 显示了四种退化类型沼泽湿地土壤在 0~30 cm 土层全钾的变化趋势。由图可知，随着退化程度加深以及土层增加，土壤中 TK 含量逐渐增加。值得注意的是，重度退化沼泽湿地中土壤 TK 含量显著高于其他类型的沼泽湿地，随着沼泽湿地的退化，土壤的水分条件发生了显著变化，由原本的长期淹水转变为较为干燥的状态。这种水分条件的改变影响了土壤中钾元素的循环和分布。在湿润环境下，钾元素可能更多地以离子形式存在于土壤溶液中，而随着土壤变干，这些钾离子可能被土壤颗粒吸附或固定下来，从而导致土壤中全钾含量的相对增加。此外，TK 在结构上以长石和伊利石等含 K 硅铝酸盐的“结构钾”为主，受母质与粒级控制。退化导致泥炭变薄、矿质基质出露与相对比例上升，从而在各层均表

现为 TK 增大；这种效应在表层最为显著，例如重度退化湿地较未退化湿地增加了 14.21 g·kg^{-1}。综上，TK 表现为随退化与深度升高且未退化剖面在深层出现跃增的格局，反映退化驱动的泥炭层变薄－矿质基质占比提高过程。与 SOM 以及 TN 的下降相对照，表明沼泽湿地土壤系统由“有机主导”向“矿质主导”转变。

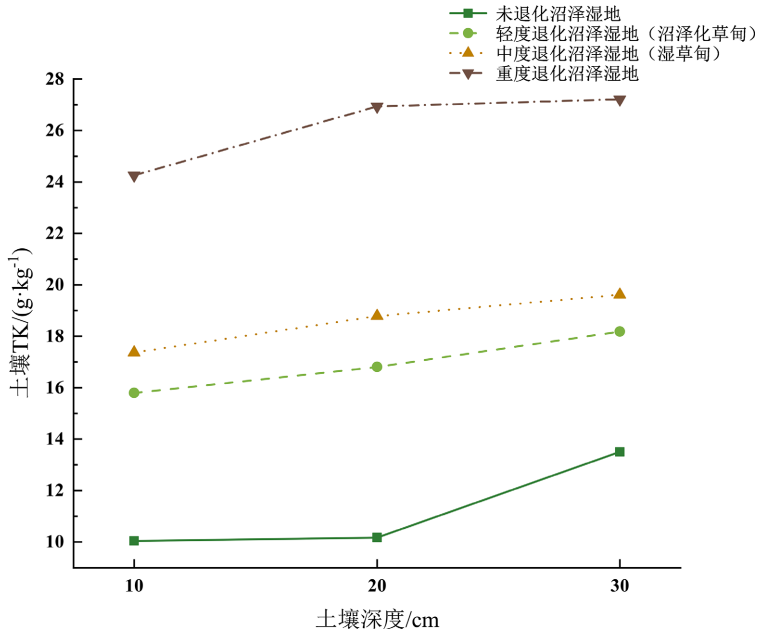

Figure 9. Total potassium content (0~30 cm) in marsh wetland soils with varying degrees of degradation
图 9. 不同退化程度的沼泽湿地土壤 0~30 cm 全钾含量

3.3. 沼泽湿地退化的驱动因子及其作用路径

综合上述植被与土壤参数的协同变化特征，祁连山国家公园沼泽湿地的退化是全球气候变化与区域人为活动叠加驱动的结果，其作用路径可归纳为两个相互耦合的过程。一方面，气候持续变暖导致多年冻土退化、蒸散作用增强，地下水位不断下移[17] [18]，湿地地表由常年积水演变为季节性积水直至完全消失，土壤含水率显著下降(本研究中 0~30 cm 土层平均含水率由未退化湿地的 43.27%降至重度退化湿地的 27.68%)，剖面水热梯度趋于扁平，为有机质的好氧分解和氮素的矿化损失创造了条件；另一方面，长期过度放牧通过家畜采食与践踏直接削弱了藏嵩草、矮嵩草等莎草科优势种的竞争能力，生境旱化又为高原鼠兔等啮齿动物的繁衍提供了适宜条件，鼠洞密度由每平方米 0~2 个增至 10~24 个以上，鼠类挖掘进一步破坏草皮层与泥炭层结构，加速土壤水分散失和有机碳氧化。

由此形成“气候变暖－水位下移－植被退化－鼠害加剧－土壤碳氮库衰减”的级联反馈环：植被退化降低地表覆盖、加剧土壤蒸发与水土流失，土壤退化又反过来制约植被的恢复与更新，最终推动沼泽湿地土壤系统由“有机主导”向“矿质主导”转变。这一驱动路径与郭瑞等[17]、戴声佩等[18]关于气候变化和人类活动共同塑造祁连山生态环境演变格局的认识相一致；同时，本研究通过植被－土壤－小动物扰动的多指标同步观测，定量刻画了退化过程中各要素的耦合响应关系，补充了对高寒沼泽湿地退化机制的过程性理解，可为祁连山国家公园湿地的分区管控与退化湿地修复提供直接的科学依据。

4. 结论

本研究选取青海祁连山国家公园内不同退化程度的沼泽湿地作为研究对象，通过野外实地调查与室

内分析相结合的方法，系统测定并分析不同退化梯度下关键植被参数和土壤参数的变化特征。得到的结论如下：

(1) 未退化沼泽湿地的植物群落主要以藏嵩草(*Kobresia xchoenoides*)、华扁穗草(*Blysmus sinocompressus*)等为优势种，轻度退化阶段线叶嵩草(*Kobresia capillifolia*)、矮嵩草(*Kobresia humilis*)等为优势种，中度退化阶段矮嵩草(*Kobresia humilis*)、委陵菜(*Potentilla chinensis* Ser)等为优势种，重度退化阶段主要以西伯利亚蓼(*Knorringia sibirica*)、珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)等为优势种。

(2) 从未退化至重度退化，莎草科的优势种地位逐渐被削弱，而菊科、蓼科的种类逐渐增多，积水含量逐渐减少，鼠洞密度逐渐增多。随着沼泽湿地退化程度的加剧，植物高度、植被盖度、地上生物量和地下生物量均呈现出减小趋势；土壤含水量、有机质含量、全氮、全磷含量整体呈现出减小趋势，全钾以及深层土壤温度则呈现出增加趋势。

需要指出的是，本研究仍存在一定局限性：其一，本研究采用“空间换时间”(space-for-time substitution)的方法，以不同地点的样地代表退化序列，隐含各样地退化前初始条件一致的假设，难以完全排除土壤本底、微地形及水文条件差异对研究结果的潜在影响；其二，本研究基于植被生长旺季(7~8 月)的单次采样，观测结果难以反映退化湿地水热条件与植被特征的季节动态和年际变异，结论存在一定的不确定性。

未来研究建议在以下方面进一步深化：(1) 建立退化沼泽湿地长期定位监测样地，通过多年连续观测直接刻画退化过程的时间轨迹；(2) 增加不同季节和不同水文年份的重复采样，提升研究结果的稳健性；(3) 结合遥感反演与放牧控制实验，在更大空间尺度上验证本研究发现，并定量分离气候变化与人为活动对湿地退化的相对贡献，为祁连山国家公园湿地的精准保护与修复提供更坚实的科学支撑。

参考文献

[1] Mitsch, W.J. and Gosselink, J.G. (2015) Wetlands. 5th Edition, John Wiley & Sons.

[2] Zedler, J.B. and Kercher, S. (2005) Wetland Resources: Status, Trends, Ecosystem Services, and Restorability. *Annual Review of Environment and Resources*, **30**, 39-74. https://doi.org/10.1146/annurev.energy.30.050504.144248

[3] Mitra, S., Wassmann, R. and Vlek, P.L.G. (2005) An Appraisal of Global Wetland Area and Its Organic Carbon Stock. *Current Science*, **88**, 25-35.

[4] Keddy, P.A. (2010) Wetland Ecology: Principles and Conservation. 2nd Edition, Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/cbo9780511778179

[5] Davidson, N.C. (2014) How Much Wetland Has the World Lost? Long-Term and Recent Trends in Global Wetland Area. *Marine and Freshwater Research*, **65**, 934-941. https://doi.org/10.1071/mf14173

[6] IPBES (2018) The IPBES Assessment Report on Land Degradation and Restoration. Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services.

[7] Gardner, R.C. and Finlayson, M. (2018) Global Wetland Outlook: State of the World’s Wetlands and Their Services to People. Ramsar Convention Secretariat.

[8] Hu, S., Niu, Z., Chen, Y., Li, L. and Zhang, H. (2017) Global Wetlands: Potential Distribution, Wetland Loss, and Status. *Science of the Total Environment*, **586**, 319-327. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.001

[9] 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.

[10] Qiu, J. (2008) China: The Third Pole. *Nature*, **454**, 393-396. https://doi.org/10.1038/454393a

[11] Yao, T., Xue, Y., Chen, D., Chen, F., Thompson, L., Cui, P., *et al*. (2019) Recent Third Pole’s Rapid Warming Accompanies Cryospheric Melt and Water Cycle Intensification and Interactions between Monsoon and Environment: Multidisciplinary Approach with Observations, Modeling, and Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **100**, 423-444. https://doi.org/10.1175/bams-d-17-0057.1

[12] 张镱锂, 李炳元, 郑度. 论青藏高原范围与面积[J]. 地理研究, 2002, 21(1): 1-8.

[13] 王根绪, 李元首, 吴青柏, 等. 青藏高原冻土区冻土与植被的关系及其对高寒生态系统的影响[J]. 中国科学 D 辑:

地球科学, 2006, 36(8): 743-754.

[14] 陈桂琛, 彭敏, 黄荣福, 等. 祁连山地区植被特征及其分布规律[J]. 植物学报, 1994, 36(1): 63-72.

[15] 范宇, 刘世全, 张世熔, 等. 西藏地区土壤表层和全剖面背景有机碳库及其空间分布[J]. 生态学报, 2006, 26(9): 2834-2846.

[16] 赵成章, 任珩. 退化草地阿尔泰针茅种群个体空间格局及关联性[J]. 生态学报, 2012, 32(22): 6946-6954.

[17] 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.

[18] 戴声佩, 张勃, 王海军, 等. 基于SPOT NDVI的祁连山草地植被覆盖时空变化趋势分析[J]. 地理科学进展, 2010, 29(9): 1075-1080.

[19] 周楠, 王蕾, 毛旭锋, 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.

[20] Bruland, G.L. and Richardson, C.J. (2005) Hydrologic, Edaphic, and Vegetative Responses to Microtopographic Reestablishment in a Restored Wetland. *Restoration Ecology*, **13**, 515-523. https://doi.org/10.1111/j.1526-100x.2005.00064.x

[21] Moreno-Mateos, D., Power, M.E., Comín, F.A. and Yockteng, R. (2012) Structural and Functional Loss in Restored Wetland Ecosystems. *PLOS Biology*, **10**, e1001247. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001247

[22] Aerts, R. and Chapin, F.S. (2000) The Mineral Nutrition of Wild Plants Revisited: A Re-Evaluation of Processes and Patterns. *Advances in Ecological Research*, **30**, 1-67. https://doi.org/10.1016/s0065-2504(08)60016-1

[23] Köchy, M., Hiederer, R. and Freibauer, A. (2015) Global Distribution of Soil Organic Carbon—Part 1: Masses and Frequency Distributions of SOC Stocks for the Tropics, Permafrost Regions, Wetlands, and the World. *SOIL*, **1**, 351-365. https://doi.org/10.5194/soil-1-351-2015

[24] 宋长春. 湿地生态系统碳循环研究进展[J]. 地理科学, 2003, 23(5): 622-628.

[25] 赵志平, 吴晓莆, 李果, 等. 青海三江源区果洛藏族自治州草地退化成因分析[J]. 生态学报, 2013, 33(20): 6577-6586.

[26] 白军红, 邓伟, 朱颜明, 等. 霍林河流域湿地土壤碳氮空间分布特征及生态效应[J]. 应用生态学报, 2003, 14(9): 1494-1498.

[27] Mitsch, W.J., Zhang, L., Waletzko, E. and Bernal, B. (2014) Validation of the Ecosystem Services of Created Wetlands: Two Decades of Plant Succession, Nutrient Retention, and Carbon Sequestration in Experimental Riverine Marshes. *Ecological Engineering*, **72**, 11-24. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.09.108

[28] Connell, J.H. (1978) Diversity in Tropical Rain Forests and Coral Reefs. *Science*, **199**, 1302-1310. https://doi.org/10.1126/science.199.4335.1302.