

DOI: 10.5846/stxb202011192975

王京, 李成一, 卓玛姐, 宋梓涵, 汪晓东, 王瑞, 索郎夺尔基, 林英华. 基于地表土壤动物与植物完整性指数评估若尔盖沼泽湿地受扰现状. 生态学报, 2022, 42(1): 340-347.

Wang J, Li C Y, Zhuo M J, Song Z H, Wang X D, Wang R, Suo Lang Duoerji, Lin Y H. Assessing disturbance status of Zoige wetland using ground dwelling soil animal and plant-based index of biotic integrity. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(1): 340-347.

基于地表土壤动物与植物完整性指数评估若尔盖沼泽湿地受扰现状

王 京¹, 李成一², 卓玛姐³, 宋梓涵², 汪晓东¹, 王 瑞¹, 索郎夺尔基³, 林英华^{1,*}

1 中国林业科学研究院湿地研究所, 北京 100091

2 青海大学农牧学院, 西宁 810016

3 四川省若尔盖湿地国家级自然保护区管理局, 阿坝藏族自治州 624599

摘要: 利用地表土壤动物与植物群落生物完整性指数评价若尔盖沼泽湿地受扰现状, 为若尔盖沼泽湿地恢复提供依据。2018年7月与2019年7月对若尔盖10处典型湿地(参照区4个, 受扰区6个)地表土壤动物与湿地植被群落进行调查。通过对74个候选指标的分布范围、判别能力及相关分析, 确定中生性植物、一年生植物、龙胆科植物、一年生植物/多年生植物比4个植物核心指标, 地表土壤动物总个体数量、中小型动物类群数量、蜘蛛目物种数量、菌食性土壤动物与腐食性土壤动物5个核心指标, 构建若尔盖沼泽湿地地表土壤动物与植物完整性指数。以所有采样点95%分位数为最佳期望值, 四分位法确定研究区域未受干扰、轻度干扰程度、中度干扰与重度干扰4个等级, 作为判断若尔盖沼泽湿地受扰状况。结果显示, 若尔盖沼泽湿地相对原始沼泽、花湖沼泽化草甸2、长期低强度排水疏干区、短期高强度排水疏干区分别处于未受干扰、轻度干扰、中度干扰与重度干扰状态。所调查的若尔盖典型湿地中, 20%的湿地未受到干扰, 30%的湿地受到轻度干扰, 30%的湿地受到中度干扰, 20%的湿地受到重度干扰。Pearson 相关系数分析显示, 地表土壤动物完整性指数与植物完整性指数存在显著正相关关系($r=0.722, P<0.05$), 表明地表土壤动物完整性指数与植物完整性指数评价结果具有一致性。

关键词: 功能群; 群落结构; 优势类群; 干扰等级; 若尔盖

Assessing disturbance status of Zoige wetland using ground dwelling soil animal and plant-based index of biotic integrity

WANG Jing¹, LI Chengyi², ZHUO Majie³, SONG Zihan², WANG Xiaodong¹, WANG Rui¹, SUO LANG Duoerji³, LIN Yinghua^{1,*}

1 Institute of Wetland Research, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016, China

3 Administration of Zoige wetland national nature reserve, Aba 624599, China

Abstract: The Zoige wetland, located at the northeast of Qinghai-Tibet Plateau, is the largest plateau wetland in China. There have been substantial changes in Zoige wetland due to natural (climate, soil, and vegetation) and anthropogenic (drainage and overgrazing) impacts. The index of biotic integrity is a comprehensive method for assessing the ecological status of wetlands. The ground-dwelling soil animal and wetland plant are the most widely used biological indicators owing to their distinct advantages for wetland ecosystem monitoring, while there is no indicator framework to determine the disturbed status and benefit of returning grazing to wetland of the Zoige area. The aim of this study is to evaluate disturbance status of

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0504802)

收稿日期: 2020-11-19; 网络出版日期: 2021-08-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: linyinghua@263.net

Zoige wetland using the ground-dwelling soil animal and wetland plant-based index of biotic integrity to providing data for the restoration of Zoige wetland. In July 2018 and July 2019, the ground dwelling soil animal and plant were investigated from 10 typical wetlands of Zoige were chosen, including 4 wetlands which were undisturbed or less disturbed, and 6 wetlands which were disturbed. The ground-dwelling soil animal and plant-based index of biotic integrity in Zoige wetland were determined through a range of index value distribution, discrimination ability, and correlation analysis of 74 candidate indicators, which included 5 metrics of the number of soil animal individuals, the number of meso/micro soil animal individual, the number of ground spiders, Fungivorous form animal and Saprozoic animal, while plant integrity index including 4 metrics of mesophyte, annuals plant, Gentians, ration of annuals/Perennials. Use the quartile method to determine four grades of undisturbed, mild, moderate, severe disturbance in the study area with 95% quantile of all sampling points as the best-expected value and judge the disturbance status of the Zoige swamp wetland. The results showed that the relatively primary wetland was undisturbance, swamp meadow 2 was mild disturbance, long-term low intensity drainage stress area was moderate disturbance, and short-term high intensity drainage stress area was severe disturbance. Among the investigated typical wetland of Zoige, 20% of wetlands were undisturbance, 30% were mild disturbance, 30% were moderate disturbance, and 20% were the severe disturbance. According to the Pearson correlation coefficient analysis, there was a significantly positive correlation between surface soil animal integrity index and plant communities integrity index ($r=0.722$, $P<0.05$), indicating that the evaluation results of surface soil animal integrity index and plant integrity index were consistent.

Key Words: functional group; community structure; dominant group; disturbance categories; Zoige

沼泽湿地是生态系统重要组成部分,是全球重要碳库和水资源库,对于维持生态系统功能、缓解全球气候变化具有重要作用^[1]。受自然因素与人为因素影响,沼泽湿地面积减少,湿地生态功能下降^[2]。评估沼泽湿地受扰状况与演变趋势,制定科学的保护与管理措施已成为国际社会关注的热点^[3]。

生物完整性指数是生态系统评价的主要方法^[4],目前广泛用于湖泊、河流、沼泽等湿地生态系统质量评价^[5-7];指示生物由鱼类^[8]扩展到底栖动物、浮游生物、植物以及脊椎动物等其他生物^[9-12];评价指标由单个生物类群扩展到的多个生物类群^[13]。土壤动物是湿地生态系统重要组成部分和指示生物^[14-15],但其在湿地生态系统的功能性作用因多种因素限制而被低估^[16]。研究显示,地表土壤动物与湿地植物均是反映湿地生态系统完整性变化的敏感性指示物^[17]。生态系统是多生物类群相互作用的复杂系统,单一类群不能代表湿地生物多样性的完整性^[18],因此综合土壤动物与植物多类指示生物评价湿地生态系统,能够准确反映反映沼泽湿地生境状况,提高湿地生态系统完整性的评估能力。

若尔盖沼泽湿地位于青藏高原东北部,是我国黄河上游重要的水源涵养区。受排水疏干与长期过牧等人类活动干扰,沼泽湿地发生不同程度改变^[19]。近年来,国家与四川省实施的一系列的湿地生态效益补偿工程,以提升受扰沼泽湿地生物多样性与水源涵养功能^[20],但相关研究多从景观尺度、水质、土壤因子、土壤微生物酶活性以及植物演替等角度分析若尔盖湿地退化现状研究^[21-22],生物完整性指教评价若尔盖沼泽湿地受扰现状未见报道。

研究选择若尔盖湿地 10 处典型湿地(参照区 4 个,受扰区 6 个)为研究区域,以湿地植物、地表土壤动物多类群为指示生物,构建适于若尔盖沼泽湿地受扰状况的评价体系与评价标准,并将地表土壤动物完整性指数与植物完整性指数评价标准进行对比并互相验证,旨在为完善退化高寒沼泽湿地的评价体系与受扰生态系统的恢复提供理论依据。

1 研究区概况

若尔盖沼泽湿地位于青藏高原东北部、四川省阿坝藏族自治州若尔盖县境内,地理坐标 32°20'—34°10'N,

102°15′—103°50′E。海拔 3400—3900m,地貌以低山、丘陵、宽谷和湖群洼地为主。属高原寒温带湿润季风气候,年均气温 0.6℃—1.2℃。年降雨量 560—860mm,降雨主要集中于 5 月—8 月,约占全年降水的 50%以上,年蒸发量约 1260—1290mm。地带性植被为沼泽植被和亚高山草甸植被。土壤类型以高原沼泽土和高原草甸土为主^[23]。

2 研究方法

2.1 样地选择

2018 年 7 月中旬,以若尔盖湿地国家级自然保护区花湖相对原始的沼泽湿地、沼泽化草甸与草甸为参照区;以近年来开展湿地生态效益示范区,包括禁牧还湿区、一年及两年草畜平衡区、季节性限牧区、长期低强度排水疏干区以及短期高强度排水疏干区等干扰区域为评估区域,即受扰区,基本情况见表 1。

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic information of sample plots

样地类型 Type of plots	位置 Site	优势种 Dominant species	干扰状况 Status	备注 Reference
相对原始沼泽 Relative primary wetland	102°49′10″E 33°55′6″N	华扁穗草(<i>B. sinocompressus</i>),三裂碱毛茛 (<i>H. tricuspis</i>)、嵩草(<i>Kobresia sp.</i>)	无人干扰。	参照点
沼泽化草甸 1 Swamp meadow 1	33°55′10″N 102°49′8″E	鹅绒委陵菜(<i>Potentilla anserina</i>)、华扁穗草 (<i>B. sinocompressus</i>)、蒲公英 (<i>Taraxacum mongolicum</i>)	无人干扰。	参照点
沼泽化草甸 2 Swamp meadow 2	33°55′24″N 102°49′50″E	嵩草(<i>Kobresia sp.</i>)、珠芽蓼(<i>Polygonum viviparum</i>)、鹅绒委陵菜(<i>P. anserina</i>)	牦牛等较少。	参照点
草甸 Meadow	33°55′17″N 102°49′1″E	垂穗披碱草(<i>Elymus nutans</i>)、鹅绒委陵菜 (<i>P. anserina</i>)、藏嵩草(<i>Kobresia tibetica</i>)	牦牛等较少。	参照点
禁牧 Grazing prohibition	102°51′48″—102°57′47″E 33°42′39″—33°42′40″N	垂穗披碱草(<i>E. nutans</i>)、苔草(<i>Carex sp.</i>)、 早熟禾(<i>Poa annua</i>)	禁牧。无人干扰。	受扰点
2 年草畜平衡试验区 2-years of herbage-animal balance area	102°57′21″—102°57′22″E 33°47′35″—33°47′36″N	藏嵩草(<i>K. humilis</i>)、华扁穗草 (<i>B. sinocompressus</i>)、鹅绒委陵菜(<i>P. Answering</i>)	全年放牧。受放牧 干扰较为严重。	受扰点
1 年草畜平衡试验区 1-year of herbage animal balance area	102°56′37″—102°56′38″E 33°47′37″—33°47′38″N	藏嵩草(<i>K. humilis</i>)、华扁穗草 (<i>B. sinocompressus</i>)、华丽龙胆 (<i>Gentiana sino-ornata</i>)	全年放牧。牦牛等 较少,轻度干扰。	受扰点
季节性限牧试验区 Seasonal Restricted grazing area	102°51′8″E,33°37′52″N	垂穗披碱草(<i>E. nutans</i>)、多枝黄耆(<i>Astragalus polycladus</i>)、小花草玉梅(<i>Anemone rivularis</i>)	冬牧场。受放牧影 响较小,轻度干扰。	受扰点
长期低强度排水疏干区 Long-term low intensity drainage stress area	102°57′21″—102°57′22″ E33°48′20″—33°48′21″N	细叶亚菊(<i>Ajaniatenuifolia</i>)、鹅绒委陵菜 (<i>P. anserina</i>)、垂穗披碱草(<i>E. nutans</i>)	夏牧场。牦牛等 较少。	受扰点
短期高强度排水疏干区 Short-term high intensity drainage stress area	102°56′3″—102°56′4″E 33°50′44″—33°50′46″N	藏嵩草(<i>K. humilis</i>)、火绒草(<i>Leontopodium wilsonii</i>)、鹅绒委陵菜(<i>P. anserina</i>)	轮牧。牦牛等较少。	受扰点

2.2 调查方法

2018 年 7 月分别采用陷阱法与植物样方法调查研究区域地表土壤动物与植物群落。2019 年 7 月对研究区域植物进行补充调查。具体调查方法如下:

每个试验区内设置 1 个 100m×100m 样方,五点法布设 5 个 10m×10m 的小样方。其中:每个 10m×10m 的小样方内沿对角线再均匀布设 3 个 0.25m×0.25m 小样方,调查其植物种类、多度与盖度。选取样地中心 10m×10m 样方,陷阱法调查地表土壤动物群落,即 10m×10m 样方均匀布设 9 个陷阱瓶(直径 65mm,高 90mm),内置 30%酒精溶液,一次性埋入土壤,且陷阱瓶上端与地表平齐,48—72 小时后将陷阱取回,带回实验室,置于 75%酒精保存。除幼虫及少部分土壤节肢动物仅鉴定到科外,均鉴定到属^[24],并依据其在凋落物分解中的作

用划分为大型与中小型土壤节肢动物与营养功能群,营养功能群依据其食性而定^[25]。

2.3 群落多样性分析

群落多样性采用 Shannon-Wiener 指数(H')、Pielou 指数(J_s)计算,即 $H' = -\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$, $J_s = \frac{H'}{\ln S}$, 式中, P_i 为第 i 个种的个体数占群落总个体数的比率, S 为类群数。

植物区系质量指数采用 FQAI = $\frac{R}{\sqrt{N}}$ 计算, 式中 R 为保守系数总值, N 为本地物种数。

2.4 候选参数选择原则

候选参数选择原则:(1)分布范围:剔除随干扰程度增加,指标值可变范围变窄,或者指标标准误差较大的生物指标;(2)判别能力:利用箱体图法判别参照点和受扰点的 25%—75%分位数范围内的重叠情况(箱体 IQ), $IQ \geq 2$ 的参数通过判别能力分析;非参数 Mann-Whitney U、Kolmogorov-Smirnov Z 的 Monte Carlo 双检验法分析 $IQ \geq 2$ 的指标,筛选参照点和受扰点间存在显著差异的指标($P < 0.05$);(3)相关性分析:Spearman 等级相关系数分析指标间的相关性,若两个相关性参数 $|r| > 0.75$,显示其参数重叠信息率高,选择其中之一作为核心指标,反之则同时选择两个指标。

2.5 生物完整性指数值计算与评价标准

生物完整性指数采用比值法计算,其中随干扰增强而减小的指标,以 95%分位数作为最佳期望值(无干扰或干扰极少状态下的值),样点指标分值=实测值/最佳期望值;随干扰增强而增大的参数,以 5%分位数作为最佳期望值,样点指标分值=(最大值-实测值)/(最大值-最佳期望值)。所有样点指标分值之和,即为该采样点的生物完整指标分值^[13]。

评价标准以所有采样点生物完整指标分值的 95%分位数作为最佳值(无干扰或干扰极少),将低于 95%分位数的生物完整指标分值,采用四分位数法划分为 4 个等级,确定研究区域生物完整性指标的评价标准,即未受干扰、轻度干扰、中度干扰与重度干扰,作为研究区域受干扰的评价标准状态。

对地表土壤动物完整性指数与植物完整性指数进行 Pearson 相关性分析,判断地表土壤动物与植物完整性指数评价结果是否一致。以上分析通过 SPSS 16.0 完成。

3 研究结果

3.1 地表土壤动物群落与植物群落多样性

研究时段,共采集到地表土壤动物 2267 头,隶属 11 目 34 科 49 属,其中地表大型土壤动物 8 目 25 科 36 属 1674 只,以弓背蚁属、佐蛛属为优势类群,蒿金叶甲属、通缘步甲属、蛱蝶科幼虫、叶甲科幼虫、叶蝉属、水虻科幼虫、蚁属、冠管蓟马属以及铺道蚁属为常见类群;地表中小型土壤动物 3 目 9 科 13 属 593 只,以等节跳属、球角跳属为优势类群,齿棘圆跳属、奇矮螨属、棘跳属、异绒螨属、鳞长跳属、小圆跳属、长跳属、圆跳属为常见类群;营养功能群以植食性、捕食性土壤动物为主。地表大型与中小型土壤动物多样性指数(H')分别介于 0.3245—2.095、0.3046—1.5600 之间,平均值分别为 1.2239 ± 0.4878 、 0.9168 ± 0.3930 ;均匀性指数(J_s)则分别介于 0.2954—0.8740、0.3220—0.8710 之间,平均值分别为 0.5265 ± 0.1596 、 0.6045 ± 0.1918 。

试验区植被调查,共鉴定出植物 61 种,隶属 19 科 51 属 61 种,莎草科、禾本科与菊科以及毛茛科植物占优势。生态型以中生、湿生植物为主。研究区域植被盖度介于 68.7%—100%之间,生物量介于 0.532—2.702 kg/m^2 之间。以鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、华扁穗草(*Blysmus sinocompressus*)为主(表 2)。多样性指数与均匀性指数分别介于 0.6463—2.6157、0.4160—0.9471 之间,平均值分别为 1.6725 ± 0.4557 、 0.7375 ± 0.1298 。

3.2 地表土壤动物与植物候选指标筛选

根据相关文献^[26],结合研究区域的地表土壤动物群落与植被群落特征,选取群落丰富度、群落结构、土壤

表 2 候选生物状况参数指标及对干扰的响应

Table 2 Candidate metrics and their expected response to the disturbance

参数类型 Metrics type	序号 Number	地表土壤动物 Ground-dwelling soil animal	响应 Responses	序号 Number	植物参数 Plant	响应 Responses
群落丰富度 Community richness	F1	总个体数量	下降	P1	总种数量	上升
	F2	类群数量	下降	P2	沼生植物物种数量	下降
	F3	湿生动物类群数量	下降	P3	湿生植物物种数量	下降
	F4	中小型动物类群数量	下降	P4	中生植物物种数量	上升
	F5	大型动物类群数	下降	P5	一年生物种数量	上升
	F6	蜘蛛目物种数量	下降	P6	多年生物种数量	下降
	F7	鞘翅目物种数量	下降	P7	单子叶物种数量	下降
	F8	缨翅目物种数量	上升	P8	双子叶物种数量	上升
	F9	半翅目物种数量	下降	P9	禾本科物种数量	上升
	F10	膜翅目物种数量	上升	P10	毛茛科物种数量	上升
	F11	双翅目物种数量	上升	P11	蔷薇科物种数量	下降
	F12	弹尾类物种数量	下降	P12	莎草科物种数量	下降
	F13	蛴螬类物种数量	下降			
群落结构 Community structure/%	F14	狼栉蛛科	上升	P13	苔草属	上升
	F15	步甲科	上升	P14	蒿草属	上升
	F16	隐翅虫科	上升			
	F17	叶甲科	上升	P15	禾本科	上升
	F18	管蓟马科	上升	P16	菊科	上升
	F19	盲蝽科	上升	P17	龙胆科	上升
	F20	叶蝉科	上升	P18	毛茛科	下降
	F21	蚊科	上升	P19	蔷薇科	下降
	F22	圆跳科	上升	P20	莎草科	下降
	F23	等节跳科	上升	P21	玄参科	上升
	F24	球角跳科	上升	P22	一年生植物/多年	上升
营养结构/植被盖度 Trophic structure /Plant cover	F25	捕食者	下降	P23	苔草属盖度	上升
	F26	植食性	上升	P24	蒿草属盖度	上升
	F27	菌食性	下降	P25	禾本科盖度	上升
	F28	腐食性	下降	P26	菊科盖度	上升
	F29	杂食性	下降	P27	龙胆科盖度	上升
				P28	毛茛科盖度	上升
				P29	蔷薇科盖度	下降
				P30	莎草科盖度	下降
				P31	一年生植物盖度	上升
			P32	多年生植物盖度	下降	
敏感性 Sensibility	F30	大型土壤动物优势类群	下降	P33	兼性植物	上升
	F31	中小型土壤动物优势类群	下降			
耐受性 Tolerance	F32	大型土壤动物稀有类群	下降	P34	仅出现一次	上升
	F33	中小型土壤动物稀有类群	上升			
Shannon-Wiener 指数	F34	大型土壤动物	上升	P35	植物群落	上升
Shannon-Wiener index	F35	中小型土壤动物	上升			
Pielou 指数	F36	大型土壤动物	上升	P36	植物群落	上升
Pielou index	F37	中小型土壤动物	上升			
植物区系质量指数 Floristic quality index				P37	植物区系质量指数	上升

F: 土壤动物参数 The parameters of soil fauna; P: 植物参数 The parameters of plant

动物群落营养结构、植物丰度、耐受度、敏感度、群落多样性与均匀性以及植物区系质量指数等 9 个类型 74 个指标为候选生物指标(表 2)。基于各指标的分布范围、综合箱线图分析以及非参数 Mann-Whitney U、Kolmogorov-Smirnov Z 的 Monte Carlo 双检验法分析结果,筛选出地表土壤动物与植物候选指标 9 个(表 3),其中地表土壤动物候选指标中小型动物类群数量(F4)与蜘蛛目物种数量(F6)、菌食性土壤动物(F27)之间以及 F6 与地表土壤动物总个体数量(F1)之间呈现较高的相关性($|r| > 0.75, P < 0.01$),但综合各个指标间的相互关系,确定保留 F1、F4、F6、F27 与腐食性土壤动物(F28);植物候选指标中生性植物(P5)与一年生植物(P17)、龙胆科植物(P22)、一年生植物/多年生植物比(P27)之间、中生植物物种数量(P4)与 P22、P27 之间以及 P22 与 P27 均存在显著的相关性($|r| > 0.75, P < 0.01$),但 P27 与 P17 均反映龙胆科植物的特征,剔除 P27,确定保留 P5、P17、P22、P27,共计 9 个指标构建生物完整指标体系。

3.3 地表土壤动物与植物完整性指数分值与评价

若尔盖湿地生物完整性指数分析显示,地表土壤动物完整性指数分值介于 1.39—3.36 之间,平均分值为 2.32 ± 0.54 ,其中最大的是花湖沼泽化草甸 2,最低的是短期高强度排水疏干区;植物生物完整性指数分值介于 0.34—4.00 之间,平均分值为 2.86 ± 1.11 ,其中最大的是花湖相对原始沼泽区,最低的是短期高强度排水疏干区,其生物完整性指标评价标准与评价如表 4。

表 3 候选参数 Spearman 相关性检验

Table 3 The correlation coefficient between candidate biotic metrics

	地表土壤动物 Ground-dwelling Soil animal					植物 Plant				
	F4	F6	F27	F28		P5	P17	P22	P27	P33
F1	0.459	0.787**	0.472	0.639*	P4	0.423	0.480	0.423	0.517	0.467
F4		0.799**	0.751*	0.742*	P5		0.979**	0.985**	0.869**	0.374
F6			0.661*	0.635*	P17			0.979**	0.853**	0.529
F27				0.672*	P22				0.848**	0.374
					P27					0.395

** 在 0.01 水平上显著相关; * 在 0.05 水平上显著相关

表 4 若尔盖沼泽湿地生物完整指数评价标准

Table 4 Rating categories of Zoige wetland disturbance status based on biotic integrity index

	生物完整指数值 Biotic integrity index	地表土壤动物 Ground-dwelling Soil animal		植物 Plant		综合评价 Comprehensive assessment	
参照区	相对原始沼泽	3.40	无	4.00	无	3.70	无
Reference sits	沼泽化草甸 1	4.36	无	3.42	轻	3.89	无
	沼泽化草甸 2	3.32	轻	3.30	轻	3.31	轻
	草甸	3.28	轻	3.93	无	3.61	轻
受扰区	禁牧	2.96	中	3.44	轻	3.20	轻
Disturbance site	1 年草畜平衡试验区	3.07	轻	2.93	中	3.00	中
	2 年草畜平衡试验区	2.96	中	1.64	重	2.30	中
	季节性限牧试验区	2.40	重	2.53	中	2.47	中
	长期低强度排水疏干区	2.57	中	1.87	中	2.22	重
	短期高强度排水疏干区	2.02	重	0.34	重	1.18	重
评价标准		无干扰 (≥ 3.34)	无干扰 (≥ 3.56)	无干扰 (≥ 3.63)			
Evaluation of the level		轻干扰 (3.02—3.34)	轻干扰 (3.12—3.56)	轻干扰 (3.10—3.63)			
		中干扰 (2.53—3.01)	中干扰 (1.81—3.12)	中干扰 (2.28—3.10)			
		重干扰 (≤ 2.53)	重干扰 (≤ 1.81)	重干扰 (≤ 2.28)			

依据生物完整性指标评价标准,原始沼泽区、花湖沼泽化草甸 2、长期低强度排水疏干区、短期高强度排

水疏干区的地表土壤动物与植物评价均表现出一致性,即分别处于未受干扰、轻度干扰、中度干扰与重度干扰四个等级,而花湖沼泽化草甸 2 与花湖草甸介于未受干扰、轻度干扰之间,禁牧试验区、2 年草畜平衡试验区则介于中度干扰、轻度干扰之间,其他则介于重度干扰、中度干扰之间。综合地表土壤动物与植物完整性指数显示,所调查的若尔盖典型湿地中,20%的湿地未受到干扰,30%的湿地受到轻度干扰,30%的湿地受到中度干扰,20%的湿地受到重度干扰。

Pearson 相关分析显示,地表土壤动物完整性指数与植物完整性指数存在显著的相关关系($r=0.722$, $P<0.05$),显示地表土壤动物完整性指数与植物完整性指数评价结果相一致。

4 讨论

自然环境条件一致的条件下,人类活动干扰及其强度是影响若尔盖沼泽湿地生态系统的重要因素^[32-33]。研究发现,长期低强度排水疏干区植物种类、多样性均高于低强度排水疏干区,且以多年生、双子叶植物为主,虽然短期高强度排水疏干区菊科种类增多,但其数量偏低,且以鹅绒委陵菜为主的毛茛科植株数低于长期低强度排水疏干区,但菊科、毛茛科植物种类与数量均明显相对原始沼泽,与李珂等(2012)研究的排水疏干能够增加植物群落的多样性相一致^[26]。

放牧可能是改变沼泽湿地地上生物分布格局与演替的驱动力之一^[27]。研究发现,禁牧试验区与季节性限牧区因夏季禁牧,植物群落 Shannon-Wiener 指数(H')明显增高,中生植物占据优势,但地表土壤动物因植被盖度偏大,其生物多样性指数偏低。草畜平衡试验区植物群落 Shannon-Wiener 指数(H')、物种丰度、湿生植物种类与株数相对增加,但其干生植物种类与数量偏低,显示放牧干扰后,植物群落以苜蓿属、龙胆属等一年生植物、以委陵菜属、披碱草属等中生植物占据优势^[20]。地表土壤动物群落则以蜘蛛类、膜翅目的蚂蚁以及弹尾虫占优势。Pearson 相关分析显示,地表中小型土壤动物个体总数与土壤全磷、全氮与有机碳存在明显的负相关($P<0.05$),弹尾虫个体总数分别与土壤表层(0—20cm)土壤全磷、土壤有机碳存在显著的负相关($P<0.05$),与土壤全氮存在显著的正相关($P<0.05$),等节跳属个体数与土壤全磷存在显著的负相关($P<0.05$),显示地表中小型土壤动物,尤其是弹尾虫个体总数与等节跳属弹尾虫与地表环境变化存在显著的关系,受干扰后种群恢复较快恢复,且其功能团也向菌食性和腐食性转变,以响应沼泽湿地生境的变化^[28]。

综合地表土壤动物完整性指数与植物完整性指数有益于准确评价若尔盖沼泽湿地受扰状况^[29]。本研究,地表土壤动物完整性指数与植物完整性指数值变化趋势不一致,其中草畜平衡试验区与季节性限牧区地表土壤动物完整性指数小于植物完整性指数,而其他均高于植物完整性指数(表 4),且相对原始沼泽、沼泽化草甸 2、长期低强度排水疏干区、短期高强度排水疏干区对受扰区状况评价相一致。长期低强度排水疏干区、短期高强度排水疏干区因中生植物数量偏大,增加了其地表土壤动物生物完整性指数值,而草畜平衡试验区、季节性限牧因生长季受牲畜的干扰程度低,一年植物以及龙胆植物两个偏多,增加了其生物完整性指数值,虽然禁牧试验区无牲畜等人为干扰、草甸相对无人干扰,但因地表植物种类少、干生植物种类偏多,导致其生物完整性指数偏大,这是否与地上植物对干扰的响应具有相对滞后性有关,有待于进一步研究确认^[2]。

以参照点为基准判断生态系统受扰程度是生态系统健康评价中最广泛运用的方法^[30-31]。本研究选择处于相对无人干扰或干扰极低的若尔盖湿地国家级自然保护区花湖缓冲区为研究区,且参照点以水分梯度分别选取相对原始沼泽、沼泽化草甸与草甸为典型区域,具有典型性和代表性^[3,32]。本研究依据资料记载,确定了受 20 世纪 60—90 年代遭受长期低强度排水疏干、短期高强度排水疏干影响的若尔盖典型区域,并结合国家与省政府近年实施禁牧试验区、草畜平衡试验区与轮牧试验场等湿地生态效益补偿示范区为研究区域,涵盖了若尔盖相对原始的沼泽区、受排水疏干的干扰区域以及近自然恢复的沼泽湿地,具有可比性,但受研究区域地理位置的限制,未来还需对该区域开展长期监测和机理性研究,以揭示若尔盖高原湿地生态系统生物要素对外界扰动的响应及其指示性作用。

5 结论

本研究构建了沼泽湿地地表土壤动物群落与植物群落生物完整性指标体系,该体系包括中生性植物、一年生植物、龙胆科植物、一年生植物/多年生植物比、地表土壤动物总个体数量、中小型动物类群数量、蜘蛛目物种数量、菌食性土壤动物与腐食性土壤动物 9 个对于干扰敏感的特征参数。综合地表土壤动物与植物生物完整性指标显示,相对原始沼泽、花湖沼泽化草甸 2、短期高强度排水疏干区分别处于未受干扰、轻度干扰与重度干扰。若尔盖湿地 10 处典型湿地中,20%湿地未受到干扰,30%湿地受到轻度干扰,30%湿地受到中度干扰,20%湿地受到重度干扰。地表土壤动物完整性指数与植物完整性指数评价具有一致性。

参考文献(References):

- [1] Keddy P A. Wetland Ecology: Principles and Conservation. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [2] Lehmitz R, Haase H, Otte V, Russell D. Bioindication in peatlands by means of multi-taxa indicators (Oribatida, Araneae, Carabidae, Vegetation). *Ecological Indicators*, 2020, 109; 105837.
- [3] 芦康乐, 武海涛, 吕宪国, 管强, 陈展彦. 基于水生无脊椎动物完整性指数的三江平原沼泽湿地健康评价. *湿地科学*, 2017, 15 (5): 670-679.
- [4] Andreasen J K, O'Neill R V, Noss R, Slosser N C. Considerations for the development of a terrestrial index of ecological integrity. *Ecological Indicators*, 2002, 1(1): 21-35.
- [5] Smith L A, Chow-Fraser P. Implications of the species-area relationship on sampling effort for marsh birds in southern Ontario. *Wetlands*, 2010, 30 (3): 553-563.
- [6] Osborne L L, Kohler S L, Bayley P B, Day DM, Wiley M J, Sauer R. Influence of stream location in a drainage network on the index of biotic integrity. *Transactions of the American Fisheries Society*, 1992, 121(5): 635-643.
- [7] Karr J R. Ecological integrity and ecological health are not the same//Schulze P C, ed. *Engineering Within Ecological Constraints*. Washington, D C: National Academy Press, 1995: 97-109.
- [8] Souza G B G, Vianna M. Fish-based indices for assessing ecological quality and biotic integrity in transitional waters: a systematic review. *Ecological Indicators*, 2020, 109; 105665.
- [9] Dauwalter D C, Pert E J, Keith W E. An index of biotic integrity for fish assemblages in Ozark highland streams of Arkansas. *Southeastern Naturalist*, 2003, 2(3): 447-468.
- [10] Gara B D, Stapanian M A. A candidate vegetation index of biological integrity based on species dominance and habitat fidelity. *Ecological Indicators*, 2015, 50; 225-232.
- [11] Chin A T M, Tozer D C, Fraser G S. Hydrology influences generalist-specialist bird-based indices of biotic integrity in Great Lakes coastal wetlands. *Journal of Great Lakes Research*, 2014, 40(2): 281-287.
- [12] Buhungu S, Sibomana C, Adjahouinou D C, Ntakimazi G, Bonou C A, Montchowui E. Assessment of the ecological status of the kinyankonge river (burundi), using a biotic integrity index of zooplankton (BII-zooplankton). *African Journal of Aquatic Science*, 2020, 45(4), 442-451.
- [13] 徐丽婷, 阳文静, 吴燕平, 游清徽, 黄琪, 徐羽, 王野乔. 基于植被完整性指数的鄱阳湖湿地生态健康评价. *生态学报*, 2017, 37(15): 5102-5110.
- [14] Scott A G, Oxford G S, Selden P A. Epigeic spiders as ecological indicators of conservation value for peat bogs. *Biological Conservation*, 2006, 127 (4): 420-428.
- [15] Gerlach J, Samways M, Pryke J. Terrestrial invertebrates as bioindicators: an overview of available taxonomic groups. *Journal of Insect Conservation*, 2013, 17(4): 831-850.
- [16] Batzer D P, Wu H T. Ecology of terrestrial arthropods in freshwater wetlands. *Annual Review of Entomology*, 2019, 65: 101-119.
- [17] Miller S J, Wardrop D H, Mahaney W M, Brooks R P. A plant-based index of biological integrity (IBI) for headwater wetlands in central Pennsylvania. *Ecological Indicators*, 2006, 6(2): 290-312.
- [18] Testi A, Fanelli G, Crosti R, Castigliani V, D'Angeli D. Characterizing river habitat quality using plant and animal bioindicators: a case study of Tirino River (Abruzzo Region, Central Italy). *Ecological Indicators*, 2012, 20; 24-33.
- [19] 刘兴土. 中国主要湿地地区湿地保护与生态工程建设. 北京: 科学出版社, 2017: 23-49.
- [20] 彭婉婷, 罗鹏, 刘长青, 唐荣华, 潘远智. 运用植物区系质量指数快速评估湿地植被恢复成效. *生物多样性*, 2014, 22(5): 564-573.
- [21] 申格, 徐斌, 金云翔, 陈实, 张文博, 郭剑, 刘航, 张玉静, 杨秀清. 若尔盖高原湿地研究进展. *地理与地理信息科学*, 2016, 32(4): 76-82.
- [22] 孙飞达, 李飞, 陈文业, 朱灿, 周裕, 苟文龙, 刘琳, 周冀琼. 若尔盖退化高寒湿地土壤理化性质、酶活性及微生物群落的季节动态. *生态学报*, 2020, 40(7): 2396-2406.
- [23] 中国科学院西部地区南水北调综合考察队. 若尔盖高原的沼泽. 北京: 科学出版社, 1965: 1-9.
- [24] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社, 1998: 1-392.
- [25] Swift M J, Heal O W, Anderson J M. *Decomposition in Terrestrial Ecosystems*. Oxford: Blackwell, 1979: 1-49.
- [26] 李珂, 杨永兴, 杨杨, 韩大勇. 基于植被数量分类的排水疏干影响下若尔盖高原沼泽退化特征. *应用生态学报*, 2012, 23(7): 1781-1789.
- [27] 韩大勇, 杨永兴, 杨杨, 李珂. 放牧干扰下若尔盖高原沼泽湿地植被种类组成及演替模式. *生态学报*, 2011, 31(20): 5946-5955.
- [28] Lindberg N, Bengtsson J. Population responses of oribatid mites and collembolans after drought. *Applied Soil Ecology*, 2005, 28(2): 163-174.
- [29] 黄宝荣, 欧阳志云, 郑华, 王效科, 苗鸿. 生态系统完整性内涵及评价方法研究综述. *应用生态学报*, 2006, 17(11): 2196-2202.
- [30] Stoddard J L, Larsen D P, Hawkins C P, Johnson R K, Norris R H. Setting expectations for the ecological condition of streams: the concept of reference condition. *Ecological Applications*, 2006, 16(4): 1267-1276.
- [31] Hawkins C P, Cao Y, Roper B. Method of predicting reference condition biota affects the performance and interpretation of ecological indices. *Freshwater Biology*, 2010, 55(5): 1066-1085.
- [32] 渠晓东, 刘志刚, 张远. 标准化方法筛选参照点构建大型底栖动物生物完整性指数. *生态学报*, 2012, 32(15): 4661-4672.