

若尔盖高原湿地植物群落结构特征与 土壤微生物群落多样性

汤木子

(四川大学 建筑与环境学院, 四川 成都 610065)

摘要: [目的] 探究若尔盖高原湿地植物群落(乌拉苔草、木里苔草、花葶驴蹄草、藏嵩草)结构特征、土壤微生物群落多样性的长期变化特征及其二者之间的演化关系,为该地区的植被恢复和生态环境保护提供借鉴。[方法] 结合室内样品分析,连续 4 a(2016—2019 年)观测了不同植物群落地上和地下各个指标的动态特征。[结果] ①对于 α 多样性,2016—2019 年若尔盖高原湿地植被 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数呈一致的变化规律,均表现为:乌拉苔草>木里苔草>藏嵩草>花葶驴蹄草,随着年份的增加而逐渐增加趋势;而 Simpson 优势度指数呈相反的变化趋势。对于 β 多样性,2016—2019 年若尔盖高原湿地植被 Cody 指数呈一致的变化规律,均表现为:乌拉苔草>木里苔草>藏嵩草>花葶驴蹄草,随着年份的增加而逐渐增加趋势;而 Sorenson 指数呈相反的变化趋势。②2016—2019 年土壤有机碳、全氮、全磷和全钾含量呈一致的变化规律,均表现为:乌拉苔草>木里苔草>藏嵩草>花葶驴蹄草,随着年份的增加而逐渐增加趋势;若尔盖高原湿地不同植物群落土壤细菌数量占绝对优势,占微生物总数的 70%左右,其次是放线菌,真菌最少;其中细菌数目、真菌数目和放线菌数目均表现为:乌拉苔草>木里苔草>藏嵩草>花葶驴蹄草,随着年份的增加而逐渐增加趋势。③土壤微生物量碳、氮、磷均表现为:乌拉苔草>木里苔草>藏嵩草>花葶驴蹄草,随着年份的增加而逐渐增加趋势;而微生物量磷不同年份之间差异不显著($p>0.05$)。④土壤微生物群落均匀度指数(E)、物种丰富度指数(H)、和碳源利用丰富度指数(S)基本表现为:乌拉苔草>木里苔草>藏嵩草>花葶驴蹄草,随着年份的增加而逐渐增加趋势;而优势度指数(D)呈相反的变化趋势,不同年份之间差异不显著($p>0.05$)。⑤土壤微生物群落多样性与植被多样性具有显著的相关性($p<0.05$)。[结论] 若尔盖高原湿地地上植被与地下微生物群落多样性之间呈强耦合关系,并且这种关系并不随时间而改变,二者具有对环境变化响应的统一性。

关键词: 若尔盖高原;湿地;植被多样性;土壤微生物

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)01-0106-08

中图分类号: S154.3, X172

文献参数: 汤木子.若尔盖高原湿地植物群落结构特征与土壤微生物群落多样性[J].水土保持通报,2022,42(1):106-113.DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2022.01.015; Tang Muzi. Plant community structure and soil microbial community diversity in Zogue Plateau wetland [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(1):106-113.

Plant Community Structure and Soil Microbial Community Diversity in Zogue Plateau Wetland

Tang Muzi

(School of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)

Abstract: [Objective] The long-term changes of plant community structure (*Carex muliensis*, *Carex meyeriana*, *Calthascaposa*, *Kobresia tibetica*) and soil microbial community diversity in the Zogue Plateau wetland, and their evolutionary relationships were investigated in order to provide reference for vegetation restoration and ecological environment protection in this area. [Methods] The dynamic characteristics of aboveground and underground indexes of different plant communities were observed in four consecutive years (2016—2019). [Results] ① For plant α diversity, the Shannon-Wiener diversity index, Margalef richness index, and Pielou evenness index showed a consistent change trend that followed the order of *Carex meyeriana*

>*Carex muliensis*>*Kobresia tibetica*>*Caltha scaposa*. However, the Simpson dominance index showed the opposite change trend. For plant β diversity, the Cody index also showed a consistent change trend that followed the order of *C. meyeriana*>*C. muliensis*>*K. tibetica*>*C. scaposa*, while the Sorenson index changed in the opposite trend. ② The contents of soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, and total potassium showed a consistent change trend that followed the order of *C. meyeriana*>*C. muliensis*>*K. tibetica*>*C. scaposa*, and gradually increased with the increasing of years. Soil microorganisms were dominated by bacteria in the Zogue Plateau wetland, accounting for about 70% of the total microbial population, followed by Actinomycetes and fungi. The numbers of bacteria, fungi, and Actinomycetes followed the order of *Carex meyeriana*>*C. muliensis*>*K. tibetica*>*C. scaposa*, and numbers gradually increased with the increasing of years. ③ Soil microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus followed the order of *C. meyeriana*>*C. muliensis*>*K. tibetica*>*C. scaposa*, and values gradually increased with the increasing of years. However, no significant differences were found in microbial biomass phosphorus among different years ($p>0.05$). ④ Soil microbial evenness index (E), species richness index (H), and carbon source using basic richness index (S) followed the order of *C. meyeriana*>*C. muliensis*>*K. tibetica*>*C. scaposa*, and values gradually increased with the increasing of years, while the dominance index (D_s) showed the opposite change trend, with no significant difference among different years ($p>0.05$). ⑤ Soil microbial community diversity and plant diversity were significantly correlated with each other ($p<0.05$). [Conclusion] There is a strong coupling between aboveground vegetation diversity and microbial community diversity in the Zogue Plateau wetland, and this coupling do not change with year, thereby indicating a unified response to changing environments.

Keywords: Zogue Plateau; wetland; vegetation diversity; soil microorganisms

陆地及水域等构成了纷繁复杂的生态系统,其中又包含数量众多的生态子系统。湿地是地球表层中由水陆生态系统相互作用形成的过渡性自然综合体,具有独特的植物群落结构特征和较高的生物多样性,是生态系统中至关重要的组成部分,为动植物提供了丰富的资源和环境^[1-3]。从生态环境的角度来讲,由于湿地的构成要素众多且存在显著的交互作用,因此其复杂性和多样性尤为突出,对于水陆生态而言更是如此,作为人类生存发展的载体,动植物的生长发育均受其直接制约,而湿地植物群落的结构与特征是湿地土壤与微生物因子的综合效应^[4-5]。立足于湿地生态环境,其中关键的构成部分离不开土壤和微生物,绝大多数植被的生长发育离不开土壤,在物质和能量交换过程中离不开微生物,从而形成了土壤—植物局地生态系统^[6]。作为土壤生态的重要构成部分,微生物对于凋落物的分解发挥着无可替代的效果,同时在酶的参与下进一步提升了分解效果,二者是息息相关的,此外,环境因子也发挥着明显的制约效应^[7-9]。土壤微生物在凋落物等腐殖质的降解转化过程中尤为关键,直接制约着土壤肥力及活性,因此,在环境因子中微生物常常作为关键指标对生态系统起着决定性作用,土壤与微生物及植被之间的关系具有重要的现实意义^[10-11]。

若尔盖湿地属于典型的高原沼泽湿地,且分布面

积较广,由于地处青藏东缘,地理位置的特殊性也造就了其特殊地位:不仅是黄河源头区域,而且还是长江源头区域,成为典型的“高原之肾”;由于其蓄水效应等显著,也具有“黄河蓄水池”的美誉,在水质调节方面具有重要作用。由于面积分布广、地理位置特殊,生态分布的多样性显著,在局地生态碳循环方面效果显著,同时具有重要的经济价值^[12-13]。对于该区域而言,由于独特的生态环境,植被群落结构复杂,物种较为丰富^[14-15],对于该区域碳平衡具有关键的调节作用;对于湿地的植物群落结构而言,通过连续的碳输入影响着土壤碳的固存,而土壤微生物在这过程中发挥着重要作用,主要是通过呼吸作用来影响土壤碳的固存。

随着工业进程的不断深入,人类活动干预也日渐突出,对该区域的生态环境产生了较大的影响:①造成了湿地分布面积呈大幅的下降;②湿地水质质量明显下降,原有生态环境和栖息地被大幅改变,生物多样性逐年降低,植被生产力也明显降低,导致各生态系统服务功能衰减^[16]。由于若尔盖湿地区域地处两大流域的源头,其重要地位尤为显著,植被多样性稳定直接关乎整个湿地的多样性。基于此,本文2016—2019年研究了若尔盖高原湿地不同植物群落结构特征与土壤微生物群落多样性的长期变化特征及其二者之间的演化关系,以期为该区的植被恢复和生态环境保护提供有益的借鉴。

1 研究区概况

若尔盖县位于四川省西北部,地处青藏高原东北部的若尔盖高原上,地理位置介于东经 $102^{\circ}08' - 103^{\circ}39'$,北纬 $32^{\circ}56' - 34^{\circ}19'$ 之间。在行政上与玛曲县、碌曲县、若尔盖县、阿坝县和红原县相邻。试验地点位于四川阿坝若尔盖县湿地国家级自然保护区管理局内。本研究选取若尔盖高原湿地不同植物群落,从 2016 年开始进行连续 4 a 的定位观测。该区域面积较广,具有典型的高原沼泽湿地特征,其紧邻青藏高原的独特地理分布,属于 3 000 m 以上的高海拔湿地,拥有独特的湿地生态特征,在中国湿地分布中显得尤为独特。受制于所在地理分布,大陆性高寒季风气候特点突出,导致昼夜温差较大,结合近年来该区域气象资料得知,最低温度达到了 -33°C ,1 月温度相对较低,约为 -10°C ,在冬季酷寒天气影响下形成了明显的冻土层;即使是进入温度较高的夏季,其均温也仅为 10°C 左右,最高气温约为 25°C 。该区域降雨量并不高,仅为 600 mm 左右,全年日照时长约为 2 400 h,植被分布方面优势物种主要有木里苔草 (*Carex muliensis*)、乌拉苔草 (*Carex meyeriana*),藏嵩草 (*Kobresia tibetica*)、花葶驴蹄草 (*Caltha scaposa*) 等。

2 材料与方法

2.1 试验方法

本试验选取的湿地植被包括木里苔草、乌拉苔草、藏嵩草、花葶驴蹄草 4 种植物群落。为了最大程度地降低试验误差,对各个群落设置 3 个样地,要求长、宽均为 20 m,在各个样地设置样方 15 个,长、宽均为 1 m。正式试验时间为 2016—2019 年,连续 4 a 定位观测。土壤的采样于每年的 8 月进行,通过 5 点混合法,将样品进行均匀混合后一部分在 -80°C 下保存,剩余部分去除杂质后进行风干处理,而后进行 0.25 mm 筛过筛处理,选取其中 50 g,磨细后过 0.05 mm 筛,然后将其用聚乙烯袋保存,以备进行指标测定,为了降低试验误差,进行 3 次重复测定。

α 多样性计算如下^[17]:

$$\text{Margalef 丰富度}(S): S = (N - 1) / \ln N \quad (1)$$

$$\text{Wiener 多样性}(H): H = -\sum(P_i \ln P_i) \quad (2)$$

$$\text{Simpson 优势度}(D): D = 1 - \sum(P_i)^2 \quad (3)$$

$$\text{Pielou 均匀度}(JP): JP = H / \ln S \quad (4)$$

β 多样性计算如下^[15]:

$$\text{Cody 指数} = (a + b) / 2 \quad (5)$$

$$\text{Sorenson 指数} = 2j / (a + b) \quad (6)$$

式中: N 表示样方中物种数目; P_i 表示重要值,计算方法为:(相对盖度+相对多度+相对高度)/3; a 表示样方 1 的物种数目; b 表示样方 2 的物种数目; j 表示样方 1 和 2 的共有物种数目。

2.2 土壤微生物群落功能多样性

土样养分、微生物量和微生物数目参考《土壤农化分析》^[18]。

Biolog-Eco 板中的碳源共有 31 种,为了对微生物的利用水平进行较准确的探究,本研究借助于平均颜色变化率(AWCD)这一研究方式。AWCD 值越大,说明土壤微生物对碳源的利用水平越高,且微生物具有更大的丰富度,该值的计算公式如下^[18]:

$$\text{AWCD} = \sum[(C_i - R) / 31] \quad (7)$$

式中:第 i 孔的吸光值用 C_i 代表,而对照孔则用 R 表示;若 $(C_i - R) < 0$,则计算过程中将之记为 0,即 $(C_i - R) \geq 0$ 。

土壤微生物作为土壤肥力保持的重要参与者,其群落多样性的测量常通过以下指数测定实现:Shannon 多样性指数 (H),McIntosh (P_i) 和 Simpson (D_s) 指数^[18]。

$$\text{AWCD} = \sum(C_i - R_i) / n \quad (8)$$

$$H = -\sum P_i (\ln P_i) \quad (9)$$

$$P_i = (C_i - R_i) / \sum(C_i - R_i) \quad (10)$$

S = 被利用碳源的总数

(当吸光值 ≥ 0.25 的情况下微孔总和)

$$D = 1 - \sum P_i \quad (11)$$

式中: C_i 为第 i 孔的吸光值; R 为对照孔的吸光值。对 $(C_i - R) < 0$ 的孔,计算中记为 0,即 $(C_i - R) \geq 0$ 。 P_i 为第 i 孔的相对吸光值与所有整个微平板的相对吸光值总和的比值。

2.3 统计分析

采用 SPSS 21 和 Excel 2010 进行数据整理和分析,其中所有的值均为平均值 \pm 标准偏差表示,采用单因素方差分析(LSD 方法)比较不同年份各个指标之间的差异显著性($p < 0.05$),用 Pearson 相关系数法检验各个指标之间的相关性。采用 CANACO 5.0 进行排序分析。

3 结果与分析

3.1 若尔盖高原湿地植物群落多样性特征

由表 1 可知,对于 α 多样性,2016—2019 年若尔盖高原湿地植被 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数变化趋势一致,均表现为:乌拉苔草 $>$ 木里苔草 $>$ 藏嵩草 $>$ 花葶驴蹄草,随着年份的增加而逐渐增加趋势;Simpson

优势度指数表现为:乌拉苔草<木里苔草<藏嵩草<花葶驴蹄草,呈现出随着年份的增加而逐渐增加趋势,不同年份而 Shannon-Wiener 多样性指数差异不显著($p>0.05$)。对于 β 多样性,2016—2019 年若尔盖高原湿地植被 Cody 指数呈一致的变化规律,均

表现为:乌拉苔草>木里苔草>藏嵩草>花葶驴蹄草,呈现出随着年份的增加而逐渐增加趋势;而 Sorenson 指数呈出相反的变化趋势,随着年份的增加而逐渐增加趋势,不同年份 Sorenson 指数差异不显著($p>0.05$)。

表 1 2016—2019 年若尔盖高原湿地植物群落多样性

年份	植物群落	α 多样性				β 多样性	
		Margalef 指数	Shannon-Wiener 指数	Simpson 指数	Pielou 指数	Cody 指数	Sorenson 指数
2016	木里苔草	8.25±0.89 ^b	1.23±0.12 ^b	1.95±0.21 ^b	0.58±0.06 ^b	5.23±0.45 ^b	0.28±0.05 ^b
	乌拉苔草	11.21±2.12 ^a	1.47±0.35 ^a	1.78±0.41 ^b	0.76±0.05 ^a	6.57±0.34 ^a	0.15±0.02 ^c
	藏嵩草	7.14±1.34 ^b	1.10±0.42 ^b	3.24±0.23 ^a	0.52±0.04 ^b	4.14±0.56 ^b	0.41±0.04 ^a
	花葶驴蹄草	5.56±0.56 ^c	0.78±0.11 ^c	3.56±0.15 ^a	0.43±0.03 ^b	3.78±0.27 ^c	0.43±0.03 ^a
	平均值	8.04±1.45 ^C	1.15±0.26 ^A	2.63±0.27 ^C	0.57±0.04 ^A	4.93±0.39 ^C	0.32±0.03 ^S
2017	木里苔草	8.46±0.71 ^b	1.25±0.26 ^b	2.01±0.34 ^b	0.59±0.08 ^b	5.26±0.51 ^b	0.29±0.03 ^b
	乌拉苔草	11.89±1.24 ^a	1.51±0.67 ^a	1.80±0.42 ^b	0.81±0.06 ^a	6.67±0.32 ^a	0.18±0.02 ^c
	藏嵩草	7.78±0.45 ^b	1.12±0.43 ^b	3.31±0.33 ^a	0.55±0.05 ^b	4.19±0.46 ^b	0.43±0.04 ^a
	花葶驴蹄草	5.90±0.56 ^c	0.79±0.09 ^c	3.79±0.28 ^a	0.46±0.03 ^b	3.81±0.27 ^c	0.49±0.06 ^a
	平均值	8.51±1.68 ^B	1.17±0.33 ^A	2.73±0.19 ^B	0.60±0.05 ^A	4.98±0.42 ^C	0.35±0.04 ^C
2018	木里苔草	8.78±0.47 ^b	1.24±0.16 ^b	2.08±0.25 ^b	0.61±0.05 ^b	5.28±0.35 ^b	0.31±0.03 ^b
	乌拉苔草	11.98±1.27 ^a	1.56±0.31 ^a	1.91±0.42 ^b	0.83±0.08 ^a	6.72±0.24 ^a	0.19±0.02 ^c
	藏嵩草	8.07±0.97 ^b	1.18±0.67 ^b	3.87±0.37 ^a	0.58±0.05 ^b	5.01±0.31 ^b	0.45±0.05 ^a
	花葶驴蹄草	6.11±0.65 ^c	0.83±0.15 ^c	4.12±0.26 ^a	0.49±0.02 ^b	4.11±0.42 ^c	0.51±0.06 ^a
	平均值	8.74±1.56 ^A	1.20±0.29 ^A	3.00±0.25 ^B	0.63±0.05 ^A	5.28±0.51 ^B	0.37±0.04 ^S
2019	木里苔草	8.90±0.56 ^b	1.24±0.11 ^b	2.11±0.18 ^b	0.62±0.06 ^b	5.31±0.33 ^b	0.33±0.03 ^b
	乌拉苔草	12.11±2.14 ^a	1.59±0.26 ^a	1.94±0.26 ^b	0.85±0.04 ^a	6.82±0.42 ^a	0.21±0.02 ^c
	藏嵩草	8.12±1.08 ^b	1.19±0.21 ^b	4.12±0.54 ^a	0.59±0.07 ^b	5.11±0.56 ^b	0.49±0.05 ^a
	花葶驴蹄草	6.24±0.76 ^c	0.83±0.08 ^c	4.56±0.27 ^a	0.51±0.05 ^b	4.20±0.17 ^c	0.53±0.04 ^a
	平均值	8.84±1.62 ^A	1.21±0.35 ^A	3.18±0.31 ^A	0.64±0.05 ^A	5.36±0.47 ^A	0.39±0.03 ^S

注:不同小写字母表示相同年份不同植物群落差异显著($p<0.05$),不同大写字母表示不同年份均值差异显著($p<0.05$),下同。

3.2 若尔盖高原湿地不同植物群落土壤养分

由表 2 可知,2016—2019 年若尔盖高原湿地植被土壤有机碳、全氮、全磷和全钾含量呈一致的变化规律,均表现为:乌拉苔草>木里苔草>藏嵩草>花葶驴蹄草,随着年份的增加而逐渐增加趋势。2018 年和 2019 年土壤有机碳和全氮含量差异不显著($p>0.05$),二者显著高于 2016 年和 2017 年($p<0.05$)。土壤全磷在不同年份差异均不显著($p>0.05$)。其中土壤有机碳变化范围在 8.15~17.01 g/kg 之间,全氮变化范围在 1.25~1.83 g/kg 之间,全磷变化范围在 0.69~0.89 g/kg 之间,全钾变化范围在 31.09~41.23 g/kg 之间。

3.3 若尔盖高原湿地不同植物群落土壤微生物量

由表 3 可知,若尔盖高原湿地不同植物群落土壤微生物量存在一定差异。2016—2019 年土壤微生物量碳变化范围在 231.9~346.2 mg/kg 之间,整体表现为:乌拉苔草>木里苔草>藏嵩草>花葶驴蹄草,随着年份的增加呈增加趋势,不同年份土壤微生物量

碳含量差异均显著($p<0.05$),而不同年份土壤微生物量磷含量差异不显著($p>0.05$)。土壤微生物量氮变化范围在 65.3~101.5 mg/kg 之间,整体表现为:乌拉苔草>木里苔草>藏嵩草>花葶驴蹄草。微生物量磷变化范围在 15.2~26.2mg/kg 之间,整体表现为:乌拉苔草>木里苔草>藏嵩草>花葶驴蹄草。不同年份之间若尔盖高原湿地不同植物群落土壤微生物量差异不显著($p>0.05$)。

3.4 若尔盖高原湿地不同植物群落土壤微生物群落结构

由表 4 可知,若尔盖高原湿地不同植物群落土壤细菌数量占绝对优势,占微生物总数的 70% 左右,其次是放线菌,真菌最少。2016—2019 年若尔盖高原湿地植物群落土壤细菌、真菌和放线菌数量呈一致的变化规律,均表现为:乌拉苔草>木里苔草>藏嵩草>花葶驴蹄草,随着年份的增加而逐渐增加趋势;并且不同年份土壤细菌数量、真菌数量和放线菌数量差异均显著($p<0.05$)。

表 2 2016—2019 年若尔盖高原湿地不同植物群落土壤养分

年份	植物群落	有机碳/ (g · kg ⁻¹)	全氮/ (g · kg ⁻¹)	全磷/ (g · kg ⁻¹)	全钾/ (g · kg ⁻¹)
2016	木里苔草	13.67±2.14 ^b	1.53±0.26 ^b	0.76±0.06 ^b	32.13±3.23 ^b
	乌拉苔草	15.12±2.89 ^a	1.67±0.24 ^a	0.85±0.05 ^a	38.25±3.56 ^a
	藏嵩草	11.09±1.25 ^c	1.42±0.34 ^b	0.71±0.09 ^b	31.09±3.89 ^b
	花葶驴蹄草	8.45±1.67 ^d	1.25±0.67 ^c	0.69±0.07 ^b	26.13±3.12 ^c
	平均值	12.08±2.56 ^B	1.47±0.21 ^B	0.75±0.08 ^A	31.90±3.65 ^C
2017	木里苔草	13.98±2.11 ^b	1.57±0.32 ^b	0.79±0.06 ^b	34.09±3.78 ^b
	乌拉苔草	15.95±1.09 ^a	1.72±0.35 ^a	0.87±0.05 ^a	39.09±3.21 ^a
	藏嵩草	11.44±3.24 ^c	1.45±0.22 ^b	0.71±0.05 ^b	32.87±3.54 ^b
	花葶驴蹄草	9.03±1.34 ^d	1.26±0.28 ^c	0.70±0.07 ^b	27.76±3.28 ^c
	平均值	12.60±1.56 ^B	1.50±0.26 ^B	0.77±0.04 ^A	33.45±3.21 ^B
2018	木里苔草	14.35±1.25 ^b	1.60±0.16 ^b	0.81±0.08 ^b	35.78±3.65 ^b
	乌拉苔草	16.26±1.09 ^a	1.79±0.25 ^a	0.87±0.08 ^a	40.12±3.89 ^a
	藏嵩草	12.09±1.33 ^c	1.51±0.37 ^b	0.72±0.07 ^b	34.25±3.55 ^b
	花葶驴蹄草	9.87±1.27 ^d	1.30±0.18 ^c	0.70±0.06 ^b	29.10±3.42 ^c
	平均值	13.14±1.15 ^A	1.55±0.42 ^A	0.78±0.09 ^A	34.81±3.17 ^B
2019	木里苔草	14.99±1.98 ^b	1.61±0.24 ^b	0.83±0.11 ^b	36.11±3.79 ^b
	乌拉苔草	17.01±1.07 ^a	1.83±0.26 ^a	0.89±0.07 ^a	41.23±3.45 ^a
	藏嵩草	12.48±1.88 ^c	1.59±0.33 ^b	0.75±0.09 ^b	35.02±3.56 ^b
	花葶驴蹄草	10.17±1.54 ^d	1.32±0.35 ^c	0.73±0.05 ^b	31.78±3.11 ^c
	平均值	13.66±1.34 ^A	1.59±0.29 ^A	0.80±0.08 ^A	36.04±3.59 ^A

表 3 2016—2019 年若尔盖高原湿地不同植物群落土壤微生物量

年份	植物群落	微生物量碳/ (mg · kg ⁻¹)	微生物量氮/ (mg · kg ⁻¹)	微生物量磷/ (mg · kg ⁻¹)
2016	木里苔草	276.6±36.7 ^b	78.9±9.5 ^b	18.5±3.2 ^b
	乌拉苔草	303.2±35.3 ^a	87.6±6.1 ^a	23.1±3.1 ^a
	藏嵩草	254.1±36.4 ^c	71.2±5.4 ^b	17.6±1.7 ^b
	花葶驴蹄草	231.9±42.7 ^d	65.3±7.5 ^c	15.2±2.9 ^c
	平均值	266.5±33.8 ^D	75.8±7.7 ^A	18.6±3.4 ^A
2017	木里苔草	281.3±32.9 ^b	81.4±6.8 ^b	19.3±3.2 ^b
	乌拉苔草	313.7±31.9 ^a	90.2±5.2 ^a	24.1±2.3 ^a
	藏嵩草	267.9±31.6 ^c	75.3±6.7 ^b	18.6±1.6 ^b
	花葶驴蹄草	245.1±49.2 ^d	67.8±8.0 ^c	16.1±3.1 ^c
	平均值	277.0±32.3 ^C	78.7±6.6 ^C	19.5±2.0 ^A
2018	木里苔草	289.0±39.0 ^b	83.5±7.5 ^b	19.8±3.5 ^b
	乌拉苔草	325.7±27.8 ^a	96.5±4.3 ^a	25.7±3.4 ^a
	藏嵩草	278.2±35.4 ^c	79.0±9.3 ^b	19.2±3.6 ^b
	花葶驴蹄草	251.1±31.2 ^d	71.4±5.7 ^c	17.3±4.3 ^c
	平均值	286.0±40.5 ^B	82.6±6.4 ^B	20.5±3.3 ^A
2019	木里苔草	291.4±42.3 ^b	86.6±4.2 ^b	19.8±2.7 ^b
	乌拉苔草	346.2±31.2 ^a	101.5±6.1 ^a	26.2±3.4 ^a
	藏嵩草	287.7±38.9 ^b	83.2±7.6 ^b	19.8±2.2 ^b
	花葶驴蹄草	255.2±33.7 ^c	76.5±5.3 ^c	17.6±1.1 ^c
	平均值	295.1±29.0 ^A	87.0±6.5 ^A	20.9±3.2 ^A

表 4 2016—2019 年若尔盖高原湿地不同植物群落土壤微生物数量

年份	植物群落	细菌 数目(10 ⁶)	真菌 数目(10 ⁶)	放线菌 数目(10 ⁶)
2016	木里苔草	12.45±1.43 ^{ab}	0.52±0.08 ^b	3.45±0.34 ^a
	乌拉苔草	13.56±1.67 ^a	0.64±0.07 ^a	4.56±0.25 ^a
	藏嵩草	11.89±1.56 ^b	0.41±0.09 ^c	2.46±0.39 ^b
	花葶驴蹄草	10.24±1.98 ^c	0.27±0.04 ^d	2.01±0.36 ^b
	平均值	12.04±1.45 ^C	0.46±0.08 ^C	3.12±0.46 ^C
2017	木里苔草	12.98±1.58 ^b	0.58±0.04 ^b	3.78±0.42 ^b
	乌拉苔草	13.79±1.28 ^a	0.71±0.05 ^a	4.96±0.51 ^a
	藏嵩草	12.07±1.97 ^b	0.46±0.03 ^c	2.69±0.39 ^c
	花葶驴蹄草	10.64±1.67 ^a	0.29±0.03 ^d	2.35±0.42 ^c
	平均值	12.37±1.62 ^B	0.51±0.04 ^B	3.45±0.65 ^C
2018	木里苔草	13.03±1.59 ^{ab}	0.61±0.05 ^b	4.01±0.54 ^b
	乌拉苔草	14.24±1.49 ^a	0.79±0.06 ^a	5.23±0.48 ^a
	藏嵩草	12.15±1.50 ^b	0.52±0.06 ^c	3.67±0.40 ^b
	花葶驴蹄草	10.97±1.52 ^c	0.31±0.03 ^d	2.46±0.51 ^c
	平均值	12.60±1.77 ^B	0.56±0.05 ^{AB}	3.84±0.27 ^B
2019	木里苔草	13.78±1.80 ^{ab}	0.63±0.09 ^b	4.77±0.32 ^b
	乌拉苔草	14.99±1.45 ^a	0.82±0.05 ^a	6.01±0.95 ^a
	藏嵩草	12.78±1.49 ^b	0.59±0.06 ^b	4.12±0.63 ^b
	花葶驴蹄草	11.22±1.51 ^c	0.34±0.02 ^c	3.05±0.28 ^c
	平均值	13.19±1.29 ^A	0.60±0.04 ^A	4.49±0.37 ^A

由表 5 可知,若尔盖高原湿地不同植物群落土壤微生物群落功能多样性指数存在一定差异,2016—2019 年土壤微生物物种丰富度指数(H)变化范围在 1.78~4.05 之间,整体表现为:乌拉苔草>木里苔草>藏嵩草>花葶驴蹄草,随年份的增加呈增加趋势;土壤微生物均匀度指数(E)变化范围在 0.31~0.81 之间,整体表现为:乌拉苔草>木里苔草>藏嵩草>花葶驴蹄草,随年份的增加呈增加趋势,并且不同年份土壤微

生物均匀度指数(E)差异不显著($p>0.05$);优势度指数(D)变化范围变化范围在 0.42~0.62 之间,整体表现为:乌拉苔草<木里苔草<藏嵩草<花葶驴蹄草,随年份的增加呈增加趋势,并且不同年份土壤微生物优势度指数(D)差异不显著($p>0.05$);碳源利用丰富度指数(S)变化范围在 5.77~16.43 之间,整体表现为:乌拉苔草>木里苔草>藏嵩草>花葶驴蹄草,随年份的增加呈增加趋势。

表 5 2016—2019 年若尔盖高原湿地不同植物群落土壤微生物群落多样性

年份	植物群落	丰富度指数(H)	均匀度指数(E)	优势度指数(D)	碳源利用程度(S)
2016	木里苔草	2.34±0.45 ^b	0.56±0.06 ^a	0.45±0.03 ^a	8.89±1.09 ^a
	乌拉苔草	3.01±0.47 ^a	0.63±0.05 ^a	0.42±0.03 ^a	9.05±1.24 ^a
	藏嵩草	2.10±0.52 ^b	0.42±0.03 ^a	0.47±0.06 ^a	7.23±1.42 ^b
	花葶驴蹄草	1.78±0.42 ^c	0.31±0.06 ^a	0.51±0.05 ^a	5.77±1.35 ^c
	平均值	2.31±0.35 ^C	0.48±0.03 ^A	0.46±0.06 ^A	7.74±1.48 ^C
2017	木里苔草	2.46±0.37 ^b	0.59±0.04 ^a	0.49±0.04 ^a	9.67±1.08 ^{ab}
	乌拉苔草	3.47±0.24 ^a	0.71±0.04 ^a	0.45±0.04 ^a	10.45±1.11 ^a
	藏嵩草	2.34±0.28 ^b	0.43±0.07 ^a	0.51±0.02 ^a	8.46±1.27 ^c
	花葶驴蹄草	1.82±0.42 ^c	0.35±0.06 ^a	0.53±0.02 ^a	6.89±1.33 ^d
	平均值	2.52±0.41 ^B	0.52±0.07 ^A	0.50±0.03 ^A	8.87±1.42 ^C
2018	木里苔草	2.91±0.38 ^b	0.63±0.08 ^a	0.52±0.05 ^a	11.34±1.49 ^b
	乌拉苔草	3.87±0.27 ^a	0.78±0.03 ^a	0.49±0.03 ^a	14.56±1.43 ^a
	藏嵩草	2.78±0.26 ^b	0.49±0.05 ^a	0.56±0.04 ^a	10.33±1.07 ^b
	花葶驴蹄草	2.09±0.27 ^c	0.39±0.06 ^a	0.59±0.04 ^a	8.15±1.53 ^c
	平均值	2.91±0.33 ^A	0.57±0.07 ^A	0.54±0.05 ^A	11.10±1.76 ^B
2019	木里苔草	3.02±0.29 ^b	0.69±0.04 ^b	0.55±0.06 ^b	13.09±1.89 ^b
	乌拉苔草	4.05±0.26 ^a	0.81±0.04 ^a	0.50±0.07 ^b	16.43±1.63 ^a
	藏嵩草	3.12±0.41 ^b	0.52±0.07 ^b	0.58±0.04 ^a	11.08±1.57 ^c
	花葶驴蹄草	2.45±0.44 ^c	0.41±0.04 ^b	0.62±0.06 ^a	9.42±1.72 ^d
	平均值	3.16±0.37 ^A	0.61±0.06 ^A	0.56±0.05 ^A	12.51±1.24 ^A

3.5 植物群落多样性与土壤微生物之间的相关分析

由表 6 可知, Margalef 指数和 Shannon-Wiener 指数与细菌数量、微生物量碳、微生物量氮、物种丰富度指数(H)、碳源利用丰富度指数(S)、优势度指数(D)和均匀度指数(E)呈显著正相关($p<0.05$); Simpson 指数与细菌数量、微生物量碳、微生物量氮、物种丰富度指数(H)、碳源利用丰富度指数(S)和均匀度指数(E)呈显著负相关($p<0.05$); Pielou 指数与细菌数量、微生物量碳、微生物量氮、物种丰富度指数(H)、碳源利用丰富度指数(S)呈显著正相关($p<0.05$); Cody 指数与细菌数量、微生物量碳、微生物量氮、物种丰富度指数(H)、碳源利用丰富度指数(S)、优势度指数(D)和均匀度指数(E)呈显著正相关($p<0.05$); Sorenson 指数细菌数量、微生物量碳、

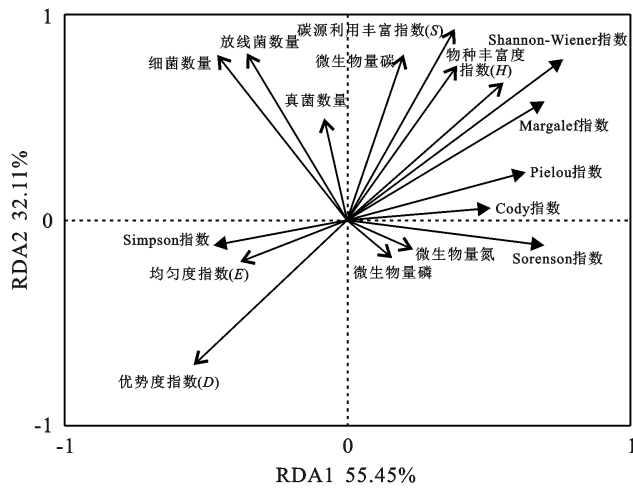
微生物量氮、物种丰富度指数(H)、碳源利用丰富度指数(S)、优势度指数(D)呈显著负相关($p<0.05$)。

此外,采用冗余分析 RDA 研究土壤养分、土壤微生物数量和微生物群落多样性的排序关系,将植物群落多样性作为响应变量,土壤养分、土壤微生物数量和微生物群落多样性为解释变量,通过排序分析更直观地展现不同的环境因子所产生的不同影响(图 1)。其中箭头象限代表着相关性,箭头长度代表相关程度,其夹角越大则说明其相关性越弱;通过对比发现,前两个排序轴的累积解释率达到了 55.45%。因此,土壤养分、土壤微生物数量和微生物群落多样性很好地解释了植物群落多样性的变化。此外,通过研究发现,土壤微生物多样性越丰富,植物多样性越丰富,二者之间存在明显的正相关关系。

表 6 若尔盖高原湿地植物群落多样性与土壤微生物之间的相关分析

项目	α 多样性				β 多样性	
	Margalef 指数	Shannon-Wiener 指数	Simpson 指数	Pielou 指数	Cody 指数	Sorenson 指数
细菌数量	0.935 [*]	0.867 ^{**}	-0.611 [*]	0.762 ^{**}	0.909 ^{**}	-0.645 [*]
放线菌数量	0.212	0.398	-0.454	0.345	0.267	-0.478
真菌数量	0.287	0.124	-0.289	0.225	0.209	-0.245
微生物量碳	0.933 ^{**}	0.979 ^{**}	-0.967 ^{**}	0.856 ^{**}	0.912 ^{**}	-0.923 ^{**}
微生物量氮	0.867 ^{**}	0.914 ^{**}	-0.734 ^{**}	0.809 ^{**}	0.856 ^{**}	-0.756 ^{**}
微生物量磷	0.198	0.092	-0.122	0.212	0.125	-0.167
物种丰富度指数(H)	0.906 ^{**}	0.925 ^{**}	-0.933 ^{**}	0.835 ^{**}	0.956 ^{**}	-0.924 ^{**}
碳源利用丰富度指数(S)	0.811 ^{**}	0.944 ^{**}	-0.625 [*]	0.778 ^{**}	0.833 ^{**}	-0.634 [*]
优势度指数(D)	0.556 [*]	0.524 [*]	-0.313	0.409	0.578 [*]	-0.324
均匀度指数(E)	0.834 ^{**}	0.916 ^{**}	-0.757 ^{**}	0.411	0.898 ^{**}	-0.745 ^{**}

注: *、** 分别表示在 $p < 0.05$, $p < 0.01$ 水平上差异显著。



注:图中实心箭头和开口箭头分别代表响应变量(植物多样性)和解释变量(土壤养分、土壤微生物数量和生物群落多样性)。

图 1 若尔盖高原湿地土壤微生物群落多样性和植物群落多样性的典范相关分析

4 讨论与结论

4.1 讨论

对于湿地不同的植物群落,不仅受到土壤养分等状况的直接影响,还受到土壤微生物等调控因子的影响,主要是由于土壤有机质的合成与分解离不开微生物的代谢,土壤微生物在土壤养分循环和能量交换过程中发挥着重要作用,再加上土壤微生物自身处于不断的生长和繁殖动态中,因此,土壤微生物对于植被群落结构的影响是处于不断变化中^[19-23]。此外,环境因子(水、热条件等)也影响着植物群落多样性和结构分布特征。在土壤微生物的作用下,土壤理化特性发生改变,相应地影响着土壤微生物新陈代谢活动,影响其土壤有机质降解效率^[24-27]。通过连续 4 a 的观测分析得知,对于 α 多样性,Shannon 多样性、Margalef 丰度、Pielou 均匀度指数,虽然不同植物群落表现的有所差异,但是整体而言,变化趋势相一致,均表现为:在年份不断增加的情况下呈现上升趋势,最高的

是乌拉苔草,其次是木里苔草,而花葶驴蹄草最低;对于 Simpson 指数,呈相反的变化规律。对于 β 多样性,在年份不断增加的情况下,Cody 指数呈现上升趋势,且最高的是乌拉苔草,其次是木里苔草,而花葶驴蹄草最低;而 Sorenson 指数呈相反的变化趋势^[28-29]。综合来看,若尔盖湿地植被多样性随着年份的增加呈现整体的上升趋势,尤其是乌拉苔草群落,具有较稳定的生态群落分布;从 Sorenson 指数的角度来说,该指数的下降说明物种不断增多,这也是自然环境及人为影响综合作用的结果。

若尔盖高原湿地不同植物群落土壤细菌数量占绝对优势,占微生物总数的 70% 左右,其次是放线菌,真菌最少;其中细菌数目、真菌数目和放线菌数目均表现为:乌拉苔草 > 木里苔草 > 藏嵩草 > 花葶驴蹄草,随着年份的增加而逐渐增加趋势。对于乌拉苔草群落,大量的凋落物形成了大量的腐殖质来源,在微生物作用下,其被分解为有机质,为土壤养分的积累奠定了基础,同时,凋落物能够有效促进土壤水分的保持,利于涵养降雨等水分,从而在促进自身生长的同时提升微生物新陈代谢的条件^[30-31],最终微生物群落多样性呈一致的变化趋势。相关性分析表明,土壤微生物群落多样性与植被多样性具有显著的相关性 ($p < 0.05$) 由此说明微环境因子中微生物群落多样性显著影响湿地植被多样性。

4.2 结论

若尔盖高原湿地植物群落物种 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数呈一致的变化规律,均表现为:乌拉苔草 > 木里苔草 > 藏嵩草 > 花葶驴蹄草,随着年份的增加而逐渐增加趋势;植物群落土壤养分含量(土壤有机碳、全氮、全磷和全钾)、微生物量碳、氮、磷和土壤微生物群落多样性指数基本表现出相同的规律(乌拉苔草 > 木里苔草 > 藏嵩草 > 花葶驴蹄草),随着年份的增加而逐渐增加趋势,局部有所波动。若尔盖高原湿地植被群

落物种多样与土壤微生物群落多样性的变化相一致,二者具有正相关关系,若尔盖高原湿地地上植被与地下微生物群落多样性之间强耦合关系,并且这种关系并不随时间而改变,二者具有对环境变化响应的统一性。土壤微生物环境因子改变着土壤养分和微生物特性,另一方面土壤环境为微生物活动创造更为适宜的新陈代谢环境,二者具有明显的相互促进性,在湿地生态保护过程中要充分注重微生物和养分的协调,合理控制氮、磷等含量,发挥微生物效应。

[参 考 文 献]

- [1] Liu Min, Huang Huiqin, Bao Shixiang, et al. Microbial community structure of soils in *Bamenwan mangrove wetland* [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 8406.
- [2] Tang Yushu, Wang Lei, Jia Jianwei, et al. Response of soil microbial community in Jiuduansha wetland to different successional stages and its implications for soil microbial respiration and carbon turnover [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(3): 638-646.
- [3] Wertz S, Degrange V, Prosser J I, et al. Decline of soil microbial diversity does not influence the resistance and resilience of key soil microbial functional groups following a model disturbance [J]. *Environmental Microbiology*, 2007, 9(9): 2211-2219.
- [4] Ahn C, Gillevet P M, Sikaroodi M. Molecular characterization of microbial communities in treatment microcosm wetlands as influenced by macrophytes and phosphorus loading [J]. *Ecological Indicators*, 2007, 7(4): 852-863.
- [5] Rinklebe J, Langer U. Microbial diversity in three floodplain soils at the Elbe River (Germany)[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(8): 2144-2151.
- [6] Ma L, Jiang X, Liu G, et al. Environmental factors and microbial diversity and abundance jointly regulate soil nitrogen and carbon biogeochemical processes in Tibetan wetlands [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(6): 3267-3277.
- [7] Huang Laibin, Zhang Guangliang, Bai Junhong, et al. Desalinization via freshwater restoration highly improved microbial diversity, co-occurrence patterns and functions in coastal wetland soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 765: 142769.
- [8] Zhang Chang, Nie Shuang, Liang Jie, et al. Effects of heavy metals and soil physicochemical properties on wetland soil microbial biomass and bacterial community structure [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 557/558: 785-790.
- [9] 孟妍君,秦鹏.珠江三角洲滨海湿地土壤微生物群落多样性与养分的耦合关系[J].*水土保持研究*, 2020, 27(6): 77-84.
- [10] 郭舜,黄启堂.闽江河口湿地植物多样性与土壤养分和微生物因子关联分析[J].*水土保持研究*, 2020, 28(3): 8-12.
- [11] 张翠萍,李淑英,王蓓,等.六氯苯胁迫下 2 种湿地植物根际土壤微生物数量与酶活性变化[J].*生态与农村环境学报*, 2018, 34(2): 177-183.
- [12] 周文昌,崔丽娟,王义飞,等.若尔盖高原泥炭地生态系统碳储量[J].*生态学杂志*, 2016, 35(8): 1981-1987.
- [13] 李斌,陈发军,陶敏,等.夏季若尔盖高寒湿地水生生物群落食物网结构特征[J].*水生生物学报*, 2016, 40(2): 313-320.
- [14] 赵娜娜,宁宇,马骅,等.若尔盖湿地土壤特性空间变化研究[J].*水资源与水工程学报*, 2019, 30(1): 232-240.
- [15] 赵淑清,方精云,宗占江,等.长白山北坡植物群落组成、结构及物种多样性的垂直分布[J].*生物多样性*, 2004, 12(1): 164-173.
- [16] 周文昌,崔丽娟,王义飞,等.排水对若尔盖高寒沼泽 CO₂ 和 CH₄ 排放通量的影响[J].*中国环境科学*, 2019, 39(7): 3040-3047.
- [17] 唐志尧,方精云,张玲.秦岭太白山木本植物物种多样性的梯度格局及环境解释[J].*生物多样性*, 2004, 12(1): 115-120.
- [18] 鲍士旦.土壤生化分析[M].北京:科学出版社, 2000.
- [19] 张超凡,盛连喜,宫超,等.冻融作用对我国东北湿地土壤碳排放与土壤微生物的影响[J].*生态学杂志*, 2018, 37(2): 304-311.
- [20] 刘亚军,蔡润发,李赟璟,等.湿地土壤微生物碳源代谢活性对不同水分条件的动态响应:以鄱阳湖为例[J].*土壤*, 2018, 50(4): 705-711.
- [21] 王娜,高婕,魏静,等.三江平原湿地开垦对土壤微生物群落结构的影响[J].*环境科学*, 2019, 4(5): 2375-2381.
- [22] 肖焯,黄志刚.湿地土壤有机碳稳定性的微生物学影响机制[J].*安徽农业科学*, 2019, 47(20): 15-17.
- [23] 高艳娜,戚志伟,仲启铖,等.长期模拟升温对崇明东滩湿地土壤微生物生物量的影响[J].*生态学报*, 2018, 38(2): 711-720.
- [24] 于昊天,黄时豪,刘亚军,等.鄱阳湖湿地土壤酶及微生物生物量的剖面分布特征[J].*环境科学研究*, 2017, 30(11): 1715-1722.
- [25] 张洪霞,郑世玲,魏文超,等.水分条件对滨海芦苇湿地土壤微生物多样性的影响[J].*海洋科学*, 2017, 41(5): 144-152.
- [26] 顾城天,罗彬,王恒,等.若尔盖高原湿地水质演变特征及氮磷累积效应[J].*水土保持研究*, 2020, 27(4): 47-53.
- [27] 李秀清,李晓红.鄱阳湖湿地不同植物群落土壤养分及微生物多样性研究[J].*生态环境学报*, 2019, 28(2): 385-394.
- [28] 梁春玲.洞庭湖湿地植物群落多样性及土壤有机碳储量研究[J].*水土保持研究*, 2020, 27(6): 66-71.
- [29] 梁香寒,张克斌,乔厦.半干旱黄土区柠条林土壤水分和养分与群落多样性关系[J].*生态环境学报*, 2019, 28(9): 1748-1756.
- [30] 董李勤,杨文,姚鹏举,等.若尔盖高原湿地木里苔草生理生态特征对水深梯度的响应[J].*生态学报*, 2020, 40(2): 590-598.
- [31] 金章利,刘高鹏,周明涛,等.山地草地土壤微生物群落对土壤养分的指示作用[J].*西南农业学报*, 2019, 32(11): 2638-2645.