



吴成丹,孟昭军,刘曼红,等.挠力河自然保护区退耕湿地植物多样性及其与土壤化学因子的关系[J].江西农业大学学报,2024,46(4):969-979.

WU C D, MENG Z J, LIU M H, et al. Vegetation diversity and its relationship with soil chemical factors in reclaimed wetland in Naolihe Nature Reserve[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2024, 46(4): 969-979.

挠力河自然保护区退耕湿地植物多样性及其与土壤化学因子的关系

吴成丹¹, 孟昭军^{1*}, 刘曼红², 孟祥征², 周春来³

(1. 东北林业大学 林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 东北林业大学 野生动物与自然保护地学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 3. 黑龙江挠力河国家级自然保护区管理局红兴隆分局, 黑龙江 双鸭山 155811)

摘要:【目的】旨在探讨退耕湿地植物多样性和群落特征随恢复年限的变化, 土壤化学因子对植物多样性和群落特征的影响。【方法】选取挠力河自然保护区 2005 年、2014 年、2020 年和 2021 年退耕湿地以及自然湿地为研究对象, 在野外采样调查的基础上, 测定土壤有机碳(SOC)、速效氮(AN)、速效磷(AP)、土壤含水量(SWC)、酸碱度(pH), 计算不同退耕年限湿地植物多样性指数, 并分析土壤化学计量特征与植物多样性和群落特征的关系。【结果】(1)随着退耕年限土壤 SOC、AN 和 SWC 都呈现增加的趋势, AP 呈减少的趋势, pH 在不同恢复阶段无差异; (2)共鉴定出植物 21 科 43 属 57 种, 其中, 菊科最多为 12 种, 占研究区植物种类数的 17.54%; 其次禾本科 10 种, 占 12.05%; 蓼科和莎草科分别为 6 种和 4 种, 随着恢复年限的增加, 优势种以一年生草本植物(稗草 *Echinochloa crusgalli*、兴安薄荷 *Mentha dahurica* 和铁苋菜 *Acalypha australis*)向多年生草本植物和典型湿地植物(灰脉苔草 *Carex appendiculata* 和芦苇 *Phragmites australis*)演替; (3)植物生物量、群落高度和群落盖度都随退耕年限的延长呈现增加, 植物群落 Margalef 指数、Shannon-Winner 指数和 Simpson 指数随退耕年限的延长而下降; (4)SOC 和 SWC 是影响植物群落特征和植物多样性的重要因子。【结论】随恢复年限的延长, 植物多样性和群落特征在向典型湿地植物群落演变, 退耕湿地土壤 SOC 和 SWC 对退耕湿地植物群落特征和植物多样性具有重要的影响。

关键词:挠力河自然保护区; 退耕湿地; 植物多样性; 土壤化学因子

中图分类号: S153.6; X173

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1000-2286(2024)04-0969-11



Vegetation diversity and its relationship with soil chemical factors in reclaimed wetland in Naolihe Nature Reserve

WU Chengdan¹, MENG Zhaojun^{1*}, LIU Manhong²,
MENG Xiangzheng², ZHOU Chunlai³

(1. College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. College of Wildlife and Protected Areas, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 3. Hongxinglong Branch of Naolihe National Nature Reserve Administration of Heilongjiang, Shuangyashan, Heilongjiang 155811, China)

收稿日期: 2023-12-18 修回日期: 2024-03-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF1300903)

Project supported by the National Key Research and Development Plan(2022YFF1300903)

作者简介: 吴成丹, 硕士生, orcid.org/0009-0008-3378-2236, 1364108897@qq.com; *通信作者: 孟昭军, 副教授, 博士, 主要从事化学生态学研究, orcid.org/0009-0005-7973-0596, mengzj2018@nefu.edu.cn。

©《江西农业大学学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

Abstract: [Objective] This study aims to explore the changes of vegetation diversity and community characteristics with restoration years and the effects of soil chemical properties on vegetation diversity and community characteristics. [Method] This paper selected restored wetlands and natural wetlands in Naolihe Reserve in 2005, 2014, 2020 and 2021 as research objects, and calculated the vegetation diversity index. Soil organic carbon (SOC), available nitrogen (AN), available phosphorus (AP), soil water content (SWC), pH were determined, and the relationship between soil stoichiometric characteristics and vegetation diversity and community characteristics were analyzed. [Result] (1) Soil SOC, AN and SWC showed an increasing trend, AP showed a decreasing trend, and pH showed no difference at different restoration stages. (2) A total of 57 species of plants from 43 genera and 21 families were identified, Among them, there were 12 species of Gramineae, accounting for 17.54% of the total vegetation species, 10 species of Compositae were identified, accounting for 12.05%. There are 6 species of Polygonaceae and 4 species of Cyperaceae. With the increase of recovery years, the dominant species are annual herbs (*Echinochloa crusgalli*, *Mentha dahurica*, and *Acalypha australi*) to perennial herbs and typical wetland plants (*Carex appendiculata* and *Phragmites australis*) succession; (3) Plant biomass, community height and community coverage all increased with the increase of years of reforestation, while Margalef index, Shannon-Winner index and Simpson index decreased with the increase of years of reforestation. (4) SOC and SWC are important factors affecting plant community characteristics and plant diversity. [Conclusion] With the extension of restoration years, plant diversity and community characteristics are evolving into typical wetland plant communities. Soil SOC and SWC of reclaimed wetlands have important effects on the vegetation communities construction and the vegetation diversity of reclaimed wetlands.

Keywords: Naolihe Nature Reserve; restoring farmland to wetland; vegetation diversity; soil factors

【研究意义】湿地是地球自然生态系统的重要组成部分,具有其他生态系统不可替代的功能和作用,由于人口、资源、环境矛盾日益突出,湿地受到严重破坏,区域环境恶化、生物多样性损失严重^[1-2]。农业活动是自然湿地损失的主要驱动因子之一,退耕还湿是保护区湿地修复的重要手段,不仅可以改善退化湿地的生态环境,还可以促进退化湿地重新建立自我调节机制^[3-4],在湿地的修复和保护起着十分重要作用。为保证退耕后恢复湿地生态功能,保护管理部门开展了一系列修复举措,如开凿沟渠、微地形营造,将水源引入湿地,增加湿地土壤湿度,促进植被生长,降低土壤盐分等^[5]。退耕还湿生态修复工程的实施对湿地植物物种多样性、植物群落稳定性和土壤理化性质等具有重要影响^[6-7]。【前人研究进展】湿地植物是湿地的重要部分,湿地自然环境受植物构成、分布及其物种多样性的影响极大^[8],而植物多样性的增加还为动物提供了多样化的食物来源与栖息场所,对湿地生态功能和生态系统稳定性起着举足轻重的作用^[9-11]。退耕湿地修复效果的监测是检验湿地修复过程中的重要环节,对修复湿地植物、土壤、微生物等生态指标进行检测,对及时了解植物多样性和土壤环境的动态变化有重要作用^[12]。但在湿地生态修复过程中,其修复效果和修复速度存在较大的不确定性,现有研究表明,退耕湿地需要至少10年以上的修复时间才能达到自然湿地的水平。因此,有必要对修复湿地的植被、土壤等生态指标进行持续的监测,以掌握湿地修复过程中环境因子的变化情况^[13]。此外,湿地在不同退耕阶段的响应不同,湿地恢复早期,植被以吸收养分为主;恢复后期则以输出养分为主^[14]。由此可见,不同退耕年限对湿地植物多样性、土壤化学性质等具有不同的影响。目前的研究多集中于湿地生态修复对植物物种多样性或土壤化学性质等单一方面指标的影响^[15-18],对二者之间相互作用关系的研究还不多。因而需要加强对退耕湿地生态修复效果的检测,以揭示不同生态指标之间的相互作用机理和内在联系。

【本研究切入点】20世纪大规模的垦殖严重抑制了挠力河国家级自然保护区湿地生态功能的发挥^[4]。农业的发展导致挠力河流域原始的天然湿地面积不断减少,湿地生态功能、社会效益锐减,抵御自然灾害能力减弱。在国家湿地保护修复政策的指引下,挠力河国家级自然保护区大力开展退耕还湿工作,截止到2021年保护区湿地面积逐年增加,生态环境已逐渐改善^[19-20]。【拟解决的关键问题】本研究在挠力河国

国家级自然保护区选取2005年、2014年、2020年和2021年的退耕湿地,通过样方法进行外业调查、分析植物群落特征、植物多样性和土壤化学性质的动态变化,对土壤化学性质对植物群落特征和植物多样性的影响进行探讨,以为挠力河国家级自然保护区退耕湿地植物多样性修复和保护提供重要的基础数据。

1 材料与方 法

1.1 研究地概况

黑龙江挠力河国家级自然保护区(东经132°57'25"~134°10'24",北纬46°30'10"~47°22'17")位于三江平原腹地;隶属于宝清、饶河、富锦和抚远三县一市行政区内的红兴隆和建三江两个农垦管理局境内;该地属于中温带湿润半湿润大陆性季风气候区,年平均降水量为537.2 mm^[21]。截止2021年,挠力河国家级自然保护区总计退耕还湿148 120 hm²。保护区主要以自然修复与人工修复相结合的方式对退耕湿地进行修复和综合整治,保护区耕地面积逐年减少,湿地面积不断扩大,保护区内生态环境有了明显改善,湿地生态功能恢复初见成效。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设计与样品采集

本研究于2022年6—9月,利用调查取样方法对挠力河国家级自然保护区实验区退耕湿地及自然湿地植物和土壤进行采样调查,按研究区实际情况和不同退耕年限设置10个样地,其中2021年退耕湿地(R1)、2020年退耕湿地(R2)和2014年退耕湿地(R8)各2个样地,2005年退耕湿地(R17)为1个样地,自然湿地(NW)3个样地,每个样地设置3个1 m×1 m样方平行样,共计30个样方。并将整个恢复年限划分为不同的时期,分别为恢复前期(R1-R2)、恢复中期(R8)和恢复后期(R17)。分别调查样方内的植物种类,并记录植物株数、高度和盖度等。在原植物样方处取0~10 cm表层土壤,剔除根系和杂物后烘干,用100目筛选出土壤样本,密封保存用于土壤化学性质测定。

1.2.2 土壤化学性质测定

采用重铬酸钾—外加热法测定土壤的有机碳含量(soil organic carbon, SOC);用碱解—扩散法测定土壤速效氮(available nitrogen, AN);利用0.5 mol/L碳酸氢钠浸提法测定土壤速效磷(available phosphorus, AP);土壤含水量(soil water content, SWC)用0.001 g精度的天平,先称量土样的原土重,在105 °C烘箱内烘6~8 h至恒重,称量土样的烘干土重,土壤含水量=(原土重-烘干土重)/烘干土重×100%;pH值用雷磁pH计测定。

1.2.3 植物群落特征参数

本研究中植物优势种的确定采用重要值方法^[22-25],基于各样方植物高度、盖度、多度,计算得出各物种的重要值:

$$\text{重要值} = (\text{相对高度} + \text{相对盖度} + \text{相对多度})/3 \quad (1)$$

式(1)中,相对高度等于某种植物的平均高度除以群落中所有物种的平均高度之和,相对盖度等于某种植物的分盖度除以群落中所有物种的分盖度之和,相对多度等于某种植物的个体数目除以群落中所有物种的个体数目。

生物量指生态系统中生物的总质量,通常用生物体积或生物干重来衡量^[26]。本研究中生物量用植物干重来衡量。

1.2.4 植物多样性指数

本研究选用丰富度指数(richness index)、综合多样性指数(diversity index)和均匀度指数(evenness index)3种指数,计算公式如下^[22-25]:

$$\text{Margalef 丰富度指数}(S): S = (N - 1)/\ln N \quad (2)$$

$$\text{Simpson 优势度指数}(D): D = 1 - \sum_{i=1}^s P_i^2 \quad (3)$$

$$\text{Shannon-Winner 多样性指数}(H'): H' = -\sum_{i=1}^s P_i \ln P_i \quad (4)$$

$$\text{Pielou 均匀度指数}(E): E = H'/\ln N \quad (5)$$

式(2)、(3)和(4)中, N 为样地中所有物种个体总数, P_i 为第*i*种植物个体数量在总个体数量(N)中的比例。

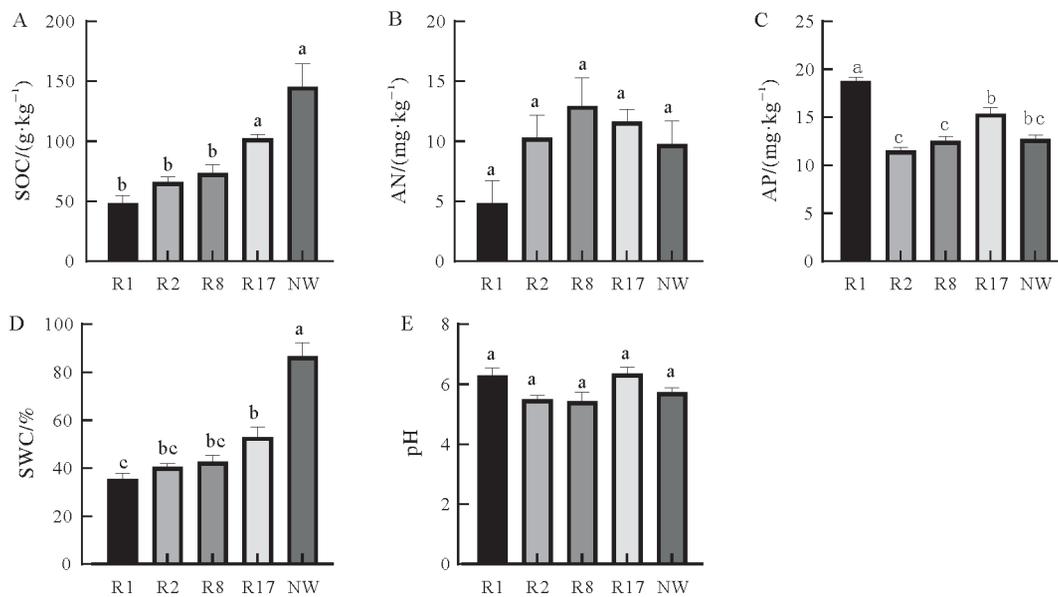
1.3 数据处理

采用Excel 2016、SPSS 25.0软件对试验数据进行统计分析。根据每个采样点的维管植物群落组成,进行Shannon-Winner多样性指数、Margalef丰富度指数、Simpson优势度指数等生物多样性指数分析。3种指数的计算通过使用PAST4.11进行。使用R软件中的metaMDS完成非度量多维标度分析(NMDS);采用单因素(one-way ANOVA)和多重比较法(Multiple comparisons)对植物群落特征、多样性指数以及土壤化学性质等进行差异分析,并使用GraphPad Prism9.5进行绘图。用Pearson相关性方法分析不同退耕年限群落物种多样性指数、植物群落特征与土壤化学计量特征之间的关系,并采用Canoco 5.0进行冗余分析(RDA)。

2 结果与分析

2.1 土壤化学特征

本研究通过对退耕湿地R1、R2、R8和R17的土壤有机碳、速效氮、速效磷、含水率和pH含量进行测定,研究表明,SOC含量随恢复年限的增加而增加(图1A)。AN含量随恢复年限增加其含量呈“抛物线”式的变化规律(图1B);AP含量则随恢复年限呈“V”字形的变化规律(图1C);随恢复年限的增加,SWC整体呈增加的趋势,但均低于自然湿地(图1D);pH随恢复年限的增加无明显变化趋势(图1E)。



SOC:土壤有机碳;AN:速效氮;AP:速效磷;SWC:土壤含水量;pH:酸碱度;R1:2021年退耕湿地;R2:2020年退耕湿地;R8:2014年退耕湿地;R17:2005年退耕湿地;NW:自然湿地。

SOC:soil organic carbon;AN:available nitrogen;AP:available phosphorus;SWC:soil water content;pH:potential of hydrogen;R1:2021 returned wetland;R2:2020 returned wetland;R8:2014 returned wetland;R17:2005 returned wetland;NW:natural wetland.

图1 不同恢复年限对湿地土壤化学性质的影响

Fig.1 Effects of different restoration years on soil chemistry of wetland

2.2 植物群落动态变化特征

退耕湿地共采集21科43属57种植物,其中禾本科物种展现绝对优势,为10种,占全部调查植物种类的17.54%;其次是菊科12种,占12.05%;蓼科和莎草分别为6种和4种。随着湿地的恢复,在植物群落恢复后期,灰脉苔草(*Carex appendiculata*)、芦苇(*Phragmites australis*)、乌拉草(*Carex meyeriana*)逐渐代替前期的稗草(*Echinochloa crusgalli*)、兴安薄荷(*Mentha dahurica*)和铁苋菜(*Acalypha australi*)成为群落的优势种。

随着恢复年限的增加,植物生物量、群落高度和群落密度都呈现增加趋势,在恢复初期,退耕地被以稗草为主的一年生草本植物群落覆盖,这在大多数退耕农田中是常见的。恢复中期,可以观察到几种湿地

植物,如芦苇,但一年生植物(如稗草和红蓼)仍然是主要物种。到了恢复后期,一年生植物数量减少,该地以多年生植物为主。自然湿地主要是菰和泽泻等湿地植物(表1)。

表1 不同恢复年限植物群落基本特征

Tab.1 Basic characteristics of vegetation communities with different restoration years

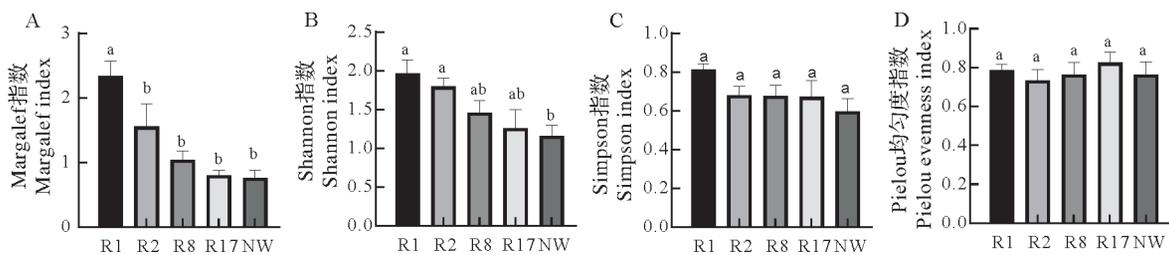
样地 Sampling sites	生物量 Biomass	群落高度 Community height	群落盖度 Community coverage	优势种 Dominant species
R1	0.39±0.41 ^b	44.21±12.02 ^b	0.37±0.12 ^b	稗草(<i>Echinochloa crusgalli</i>)、兴安薄荷(<i>Mentha dahurica</i>)、铁苋菜(<i>Acalypha australi</i>)
R2	0.50±0.20 ^b	52.97±14.32 ^b	0.41±0.08 ^b	红蓼(<i>Polygonum orientale</i>)、稗草、小叶章(<i>Deyeuxia angustifolia</i>)
R8	0.98±0.49 ^a	74.43±18.08 ^{ab}	0.57±0.13 ^{ab}	红蓼、羽叶鬼针草(<i>Bidens maximowicziana</i>)、芦苇(<i>Phragmites australis</i>)
R17	0.66±0.27 ^{ab}	70.55±4.07 ^{ab}	0.63±0.34 ^b	灰脉苔草(<i>Carex appendiculata</i>)、芦苇、乌拉草(<i>Carex meyeriana</i>)
NW	0.78±0.39 ^{ab}	85.22±34.55 ^a	0.69±0.22 ^b	菰(<i>Zizania latifolia</i>)、芦苇、泽泻(<i>Alisma plantago-quatica</i>)

R1:2021年退耕湿地;R2:2020年退耕湿地;R8:2014年退耕湿地;R17:2005年退耕湿地;NW:自然湿地。

R1:2021 returned wetland;R2:2020 returned wetland;R8:2014 returned wetland;R17:2005 returned wetland;NW:natural wetland.

2.3 不同修复年限植物物种多样性

本研究中 Margalef 指数、Shannon-Winner 指数和 Simpson 指数随着退耕时间的延长均呈逐渐下降的趋势, Pielou 均匀度指数的变化不明显。总体上来看恢复初期的多样性指数与自然湿地有显著差异,恢复中期与恢复后期和自然湿地的差异不显著(图2)。非度量多维尺度分析如图3所示,恢复湿地植物多样性与自然湿地存在差异。再通过 PERMANOVA 进行分析,结果表明 R1、R8 和 R17 恢复湿地的植物多样性与自然湿地有极显著差异($P<0.01$),R2 恢复湿地的植物多样性与自然湿地有显著差异($P<0.05$)。



R1:2021年退耕湿地;R2:2020年退耕湿地;R8:2014年退耕湿地;R17:2005年退耕湿地;NW:自然湿地。

R1:2021 returned wetland;R2:2020 returned wetland;R8:2014 returned wetland;R17:2005 returned wetland;NW:natural wetland.

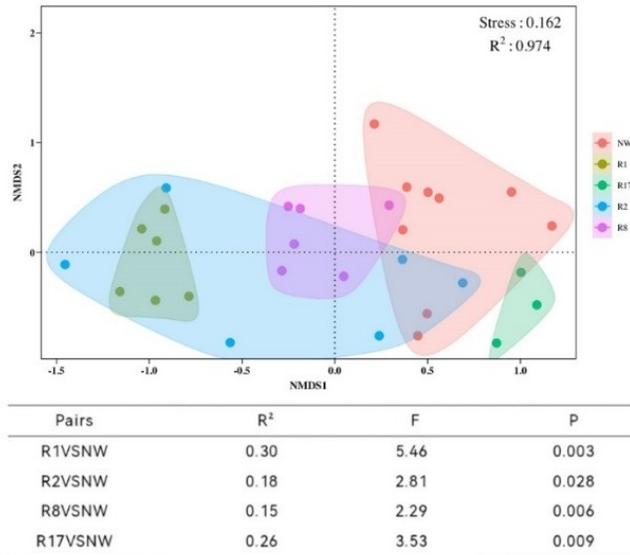
图2 不同恢复年限对植物群落物种多样性的影响

Fig.2 Effects of different restoration years on species diversity of vegetation communities

2.4 植物群落特征、植物多样性与土壤化学性质相关性分析

通过对土壤化学性质与植物群落特征、植物物种多样性指数之间的 Pearson 相关性分析,分析结果表明,土壤 SOC 与 Shannon-Winner 指数呈极显著负相关($P<0.01$),与 Margalef 指数和 Shannon-Winner 指数呈显著负相关($P<0.05$);AP 含量与群落高度呈显著正相关($P<0.05$),与生物量呈显著负相关($P<0.05$);SWC 与 Shannon-Winner 指数、Simpson 指数、Margalef 指数之间均呈极显著负相关($P<0.01$),与群落密度呈极显著正相关($P<0.01$)。

挠力河自然保护区植物群落特征、植物多样性指数与土壤化学因子的综合相关性如图4所示,结果表明,Shannon-Winner 指数、Margalef 指数和 Simpson 指数与土壤速效磷(AP)含量和 pH 正相关,与 SOC、SWC 和 AN 呈负相关;Pielou 指数与 AP、pH、SOC 和 SWC 呈正相关,而与 AN 含量负相关;生物量(biomass)与 AN 含量和 SWC 正相关,与 AP、pH 和 SOC 呈负相关;群落高度(CH)与 AN、SOC、SWC 呈正相关,而与 AP 和 pH 呈负相关;群落盖度(CD)与 AN、SOC、SWC 和 pH 呈正相关,而与 AP 负相关。土壤含水率(SWC)对植物群落特征和植物多样性指数具有极显著影响,SOC 和 pH 对各因子有显著影响。



R1:2021年退耕湿地;R2:2020年退耕湿地;R8:2014年退耕湿地;R17:2005年退耕湿地;NW:自然湿地。

R1:2021 returned wetland;R2:2020 returned wetland;R8:2014 returned wetland;R17:2005 returned wetland;NW:natural wetland.

图3 不同恢复年限植物多样性的非度量多维尺度分析(NMDS)

Fig.3 Non metric multidimensional scale analysis(NMDS)of vegetation diversity at different restoration years

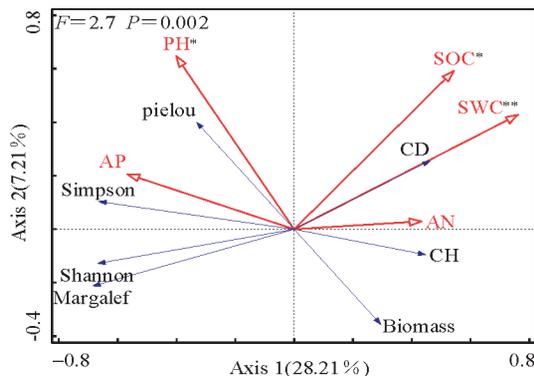
表2 土壤化学因子与植物群落特征、植物生物多样性指数之间的Pearson相关性分析

Tab.2 Pearson correlation analysis of soil chemical factors with vegetation community characteristics and vegetation biodiversity index

	Shannon 指数 Shannon index	Margalef 指数 Margalef index	Simpson 指数 Simpson index	Pielou 指数 Pielou index	群落高度 Community height	群落盖度 Community coverage	生物量 Biomass
SOC	-0.474**	-0.421*	-0.363*	0.096	0.058	0.233	0.239
AN	0.016	-0.039	0.014	-0.074	-0.029	0.082	0.185
AP	0.228	0.298	0.161	0.000	0.419*	-0.279	-0.448*
SWC	-0.545**	-0.519**	-0.466**	-0.074	0.254	0.261	-0.087
pH	-0.125	-0.168	-0.091	-0.038	-0.130	0.212	-0.269

SOC:土壤有机碳;AN:速效氮;AP:速效磷;SWC:土壤含水量;pH:酸性。

SOC:soil organic carbon;AN:available nitrogen;AP:available phosphorus;SWC:soil water content;pH:potential of hydrogen.“*”:P<0.05;“**”:P<0.01.



AP:速效磷;SWC:土壤含水量;pH:酸性;R1:2021年退耕湿地;R2:2020年退耕湿地;R8:2014年退耕湿地;R17:2005年退耕湿地;NW:自然湿地;CH:群落高度;CD:群落盖度;Biomass:生物量。

SOC:soil organic carbon;AN:available nitrogen;AP:available phosphorus;SWC:soil water content;pH:potential of hydrogen;CH:community height;CD:Community coverage;Biomass:biomass.

图4 挠力河自然保护区植物群落特征、植物多样性与土壤化学计量特征的RDA分析

Fig.4 RDA analysis of vegetation community characteristics, vegetation diversity, and soil chemometrics in Naolihe Nature Reserve

3 讨论

3.1 湿地修复时间对植物群落结构的影响

植物群落的物种组成是反映群落结构变化的重要指示因子^[27]。有研究表明恢复湿地植物群落最初的5年内会迅速增加,但在恢复6~10年内群落结构趋于稳定^[28-31]。本研究中,挠力河自然保护区退耕湿地随着湿地恢复年限增加,植物群落生物量、群落高度和群落盖度都呈现上升的趋势。以往的研究发现在湿地恢复初期,湿地物种丰富度与均匀度都处于较高水平,植物群落结构迅速恢复,但植物种间竞争强烈,随着恢复年限的推移,植物群落通过不断的演替逐渐达到平衡^[9]。本研究中发现在不同的恢复时期,植物群落优势种发生改变,随着修复时间的增加,植物群落表现出明显的演替,表现为恢复初期的湿地主要以一年生草本植物为主,如稗草、红蓼等;恢复中期的湿地中开始出现了零星的典型湿地植物,如芦苇,但仍以一年生植物为主,如羽叶鬼针草、红蓼等;恢复后期则以多年生植物和典型湿地植物为主,如灰脉苔草和芦苇。而本研究中自然湿地的优势种全为典型湿地植物(菰、芦苇、泽泻),由此可见,随着退耕年限的增加,退耕湿地的优势种在向自然湿地相似的轨迹发展,但短期内与自然湿地仍然有较大差距。

3.2 湿地修复对植物多样性的影响

植物多样性作为群落的基本衡量指标,可以反映群落结构的复杂性,体现群落的稳定程度和生境差异,同时对生态系统的健康情况具有指示作用^[32]。有研究表明,植物种类减少和植物多样性降低是湿地恢复中的一种积极现象^[6]。本研究中随着恢复年限的增加植物多样性指数呈现下降的趋势,这与以往的研究关于恢复过程中植物多样性的变化规律的结论一致,即在恢复前期,随着恢复年限的增加植物多样性指数增加,在恢复中后期,当群落中优势种地位突出时,植物多样性会降低^[33-34]。这表明退耕还湿工程有利于湿地植物多样性的恢复,挠力河自然保护区通过推进不同时期的退耕还湿项目和采取的修复措施,使恢复湿地的植物物种丰富度呈下降趋势,退耕湿地植物向典型湿地植物群落演变。

以往的研究表明,影响植物多样性的因素有很多,如土壤含水率、土壤有机质和pH等^[35],本研究得到恢复两年的湿地(R2)的植物多样性与自然湿地植物多样性差异性更小。分析表明通过打开围堰、平整堤坝等微地形改造将挠力河的河水引入该恢复湿地,致使湿地内水源充足,促进了湿地植物的生长,有利于湿地植物多样性的恢复。水是影响湿地植物物种多样性的决定因素,随着湿地土壤含水量的变化,湿地植物群落结构也会发生相应的变化,进而影响植物的多样性特征^[31,36]。因此在湿地恢复过程应注重水文因素的影响,增加水系连通性以保障湿地内水文环境的稳定,增加湿地土壤湿度促进植被生长和湿地植物多样性的恢复。

3.3 湿地恢复过程中土壤因子对植物多样性的影响

土壤因子是与植物群落联系最紧密、对其影响最大的一类环境因子^[28]。本研究中SOC随恢复时间增加而增加,表明恢复湿地的土壤有机碳在不断的积累,土壤碳含量随恢复年限的增加而增加^[37-39]。AN随恢复年限增加其含量呈“抛物线”式的变化规律,恢复后期显著高于恢复前期,这可能与植物凋落后养分释放有关,植被的恢复促进了氮积累。AP含量则随恢复年限呈“V”字形的变化规律,恢复早期AP较高可能是由于恢复之前农业作物的施肥使土壤残留磷,而恢复后期土壤磷含量又上升可能归因于凋落物养分的释放^[40-42]。SWC随恢复时间的增加而增加,植物残留物逐年累积进入土壤,有助于增加SOC含量,提高土壤持水能力,从而增加土壤含水量^[43-44],这对典型湿地植物的恢复也起到积极的作用。

本研究中SOC和SWC是影响植物多样性最重要的环境因子,与Margalef指数、Shannon-Winner指数和Simpson指数之间均呈显著负相关关系,这表明恢复年限主要通过影响SOC和SWC从而对植物多样性产生影响。SOC同植物群落的植被覆盖度、生物量和地表凋落物量有着密切关联,是影响植物生长的重要养分。植物生长情况受土壤含水率的影响较大,与之呈正相关,随着湿地土壤含水率增加,湿地植物组成也会发生相应的变化,进而影响植物的多样性特征^[45-46]。这说明,SOC和SWC的增加使植被的生长状态将变得更好,是影响植物多样性的主要因素。

以往的研究发现,土壤速效养分随恢复年限的增加而减少^[45-47],而本研究中土壤的速效养分总体上是呈现增加的变化趋势,其原因可能是土壤的速效养分对植物多样性的影响并不是单向的,它们之间存在相互影响和相互制约关系^[48],并且还受到研究区的气候环境因子等的制约,因此不同环境间存在差异。植物多样性指数与土壤速效养分没有显著相关性,这是因为土壤养分浓度不会影响植物的多样性,而植物的生长和繁殖需要充足的养分。

4 结 论

随着退耕年限的增加,恢复湿地植物优势种由一年生向多年生植物和典型湿地植物演变,经过17年的恢复,优势种主要为芦苇和苔草,比较单一,但与自然湿地植物优势种的组成仍有较大差距。

随着退耕年限的增加湿地环境不断变化,植物生物量、群落高度和群落盖度都呈现增加的趋势,植物多样性随恢复年限的增加而下降,植物群落向典型湿地植物演替。

土壤有机碳和土壤含水率对湿地植物多样性的影响解释度最高,是影响植物多样性最主要的因素,但土壤速效养分对植物多样性的影响与以往退耕湿地相关研究结论并不一致。因此,在湿地的恢复过程中应注重水文因素的影响,后续应加强北方寒温带退耕湿地植物群落与土壤速效养分关系研究,以期为挠力河自然保护区退耕湿地的保护与修复提供科学依据。

参考文献 References:

- [1] 徐佳,戴惠忠,陈珏,等.常熟湿地高等植物的物种组成及区系特征[J].植物资源与环境学报,2022,31(1):69-82.
XU J, DAI H Z, CHEN J, et al. The species composition and floristic characteristics of higher plants in Changshu wetland[J]. Journal of plant resources and environment, 2022, 31(1): 69-82
- [2] 吴安驰,邓湘雯,任小丽,等.中国典型森林生态系统乔木层群落物种多样性的空间分布格局及其影响因素[J].生态学报,2018,38(21):7727-7738.
WU A C, DENG X W, REN X L, et al. The spatial distribution pattern and influencing factors of species diversity in tree layer communities of typical forest ecosystems in China[J]. Journal of ecology, 2018, 38(21): 7727-7738
- [3] LISHAWA S C, LAWRENCE B A, ALBERT D A, et al. Biomass harvest of invasive *Typha* promotes plant diversity in a Great Lakes coastal wetland[J]. Restoration ecology, 2015, 23(3): 228-237.
- [4] XIA J B, REN J Y, ZHANG S Y, et al. Forest and grass composite patterns improve the soil quality in the coastal saline-alkali land of the Yellow River Delta, China[J]. Geoderma, 2019, 349: 25-35.
- [5] WANG G M, LYU J Z, HAN G X, et al. Ecological restoration of degraded supratidal wetland based on microtopography modification: a case study in the Yellow River Delta[J]. Wetlands, 2020, 40(6): 2659-2669.
- [6] GUO Y Q, XU T Q, CHENG J M, et al. Above- and belowground biodiversity drives soil multifunctionality along a long-term grassland restoration chronosequence[J]. Science of the total environment, 2021, 772: 145010.
- [7] 苏卓侠,苏冰倩,上官周平.植物凋落物分解对土壤有机碳稳定性影响的研究进展[J].水土保持研究,2022,29(2): 406-413.
SU Z X, SU B Q, SHANGGUAN Z P. Research progress on the impact of plant litter decomposition on soil organic carbon stability[J]. Research on soil and water conservation, 2022, 29(2): 406-413
- [8] 邵非凡,陈禹含,崔圆,等.北方典型沼泽湿地高低土壤水分下的植物群落特征[J].生态学报,2023,43(21):1-12.
SHAO F F, CHEN Y H, CUI Y, et al. Characteristics of plant communities under high and low soil moisture in typical northern swamp wetlands[J]. Journal of ecology, 2023, 43(21): 1-12
- [9] 张冬杰,王雪宏,佟守正,等.松花江下游富锦段沿江恢复湿地植物多样性[J].湿地科学,2016,14(6):883-887.
ZHANG D J, WANG X H, TONG S Z, et al. Restore wetland plant diversity along the lower reaches of the Songhua River in the Fujin section[J]. Wetland science, 2016, 14(6): 883-887
- [10] NSOR C A, ANTOBRE O O, MOHAMMED A S, et al. Modelling the effect of environmental disturbance on community structure and diversity of wetland vegetation in Northern Region of Ghana[J]. Aquatic ecology, 2019, 53: 119-136.
- [11] 张奇奇,韩广轩,路峰,等.不同修复年限对黄河三角洲湿地植物多样性和群落稳定性的影响[J].生态学杂志,2022, 41(7): 1249-1257.

- ZHANG Q Q, HAN G X, LU F, et al. The impact of different restoration years on plant diversity and community stability in wetlands of the Yellow River Delta[J]. *Journal of ecology*, 2022, 41(7): 1249-1257
- [12] 陈彬, 俞炜炜, 陈光程, 等. 滨海湿地生态修复若干问题探讨[J]. *应用海洋学学报*, 2019, 38(4): 464-473.
- CHEN B, YU W W, CHEN G C, et al. Discussion on several issues of ecological restoration in coastal wetlands[J]. *Journal of applied oceanography*, 2019, 38(4): 464-473
- [13] LIGGETT C, KNAPPENBERGER T, SHAW J N, et al. Comparison of constructed wetlands to a preservation wetland in the Nashville Basin, Tennessee(USA)[J]. *Wetlands*, 2020, 40(5): 1635-1646.
- [14] 李裕元, 邵明安. 子午岭植被自然恢复过程中植物多样性的变化[J]. *生态学报*, 2004(2): 252-260.
- LI Y Y, SHAO M A. Changes in plant diversity during the natural restoration of vegetation in Ziwuling[J]. *Journal of ecology*, 2004(2): 252-260
- [15] 孙佳, 夏江宝, 苏丽, 等. 黄河三角洲盐碱地不同植被模式的土壤改良效应[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(4): 1323-1332.
- SUN J, XIA J B, SU L, et al. The soil improvement effect of different vegetation patterns on saline alkaline land in the Yellow River Delta[J]. *Journal of applied ecology*, 2020, 31(4): 1323-1332
- [16] 李群, 赵辉, 赵成章, 等. 洮河国家湿地公园主要植物群落多样性对土壤环境因子的响应[J]. *生态学报*, 2022, 42(7): 2674-2684.
- LI Q, ZHAO H, ZHAO C Z, et al. Response of main plant community diversity to soil environmental factors in Taohe National Wetland Park[J]. *Journal of ecology*, 2022, 42(7): 2674-2684.
- [17] 李艳琼, 林莉, 陆星星, 等. 玉溪湿地水生植物群落及伴生种初步研究[J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2012, 27(4): 590-599.
- LI Y Q, LIN L, LU X X, et al. Preliminary study on the aquatic plant community and associated species in Yuxi Wetland[J]. *Journal of Yunnan agricultural university(natural science)*, 2012, 27(4): 590-599.
- [18] LUKÁCS B A, SRAMKÓ G, MOLNÁR A. Plant diversity and conservation value of continental temporary pools[J]. *Biological Conservation*, 2013, 158: 393-400.
- [19] 侯文久, 于洪贤, 刘曼红, 等. 挠力河自然保护区不同作物类型退耕还湿地浮游植物群落结构特征[J]. *东北林业大学学报*, 2022, 50(4): 60-65.
- HOU W J, YU H X, LIU M H, et al. Characteristics of phytoplankton community structure in different crop types of returning farmland to wetlands in Naolihe Nature Reserve[J]. *Journal of northeast forestry university*, 2022, 50(4): 60-65
- [20] 刘笏旻, 徐磊, 高琳友, 等. 挠力河湿地软体动物群落对湿地恢复的生态指示作用[J]. *东北林业大学学报*, 2022, 50(2): 65-69.
- LIU J M, XU L, SHANG L Y, et al. The ecological indicator role of mollusc communities in Naoli River wetland restoration[J]. *Journal of northeast forestry university*, 2022, 50(2): 65-69
- [21] 董文涛, 侯文久, 于洪贤, 等. 黑龙江挠力河国家级自然保护区退耕的恢复湿地浮游植物群落结构特征[J]. *湿地科学*, 2022, 20(5): 655-665.
- DONG W T, HOU W J, YU H X, et al. Characteristics of phytoplankton community structure in the restored wetland of Naolihe National Nature Reserve in Heilongjiang Province[J]. *Wetland science*, 2022, 20(5): 655-665
- [22] 韩轶, 杨永梅, 郭志林, 等. 大青山小井沟自然植物群落及其土壤环境特征调查[J]. *干旱区资源与环境*, 2020, 34(12): 115-121.
- HAN Y, YANG Y M, GUO Z L, et al. Investigation of natural plant communities and soil environmental characteristics in Xiaojingou, Daqing Mountain[J]. *Resources and environment in arid areas*, 2020, 34(12): 115-121.
- [23] 胡冬, 吕光辉, 王恒方, 等. 水分梯度下荒漠植物多样性与稳定性对土壤因子的响应[J]. *生态学报*, 2021, 41(17): 6738-6748.
- HU D, LYU G H, WANG H F, et al. The response of desert plant diversity and stability to soil factors under water gradient[J]. *Journal of ecology*, 2021, 41(17): 6738-6748.
- [24] 张荣, 余飞燕, 周润惠, 等. 坡向和坡位对四川夹金山灌丛群落结构与物种多样性特征的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(8): 2507-2514.
- ZHANG R, YU F Y, ZHOU R H, et al. The impact of slope orientation and position on the structure and species diversity characteristics of shrub communities in Jiabin Mountain, Sichuan[J]. *Journal of applied ecology*, 2020, 31(8): 2507-2514.

- [25] ZHONG Z, ZHANG X, WANG X, et al. Soil bacteria and fungi respond differently to plant diversity and plant family composition during the secondary succession of abandoned farmland on the Loess Plateau, China[J]. *Plant and soil*, 2020, 448(1): 183-200.
- [26] 彭玲莉, 亢丹, 鄢郭馨, 等. 土地利用方式对湖泊洲滩湿地植物生物量的影响: 以西洞庭湖国家级自然保护区为例[J]. *中南林业科技大学学报*, 2020, 40(1): 123-130.
PENG L L, KANG D, YAN G X, et al. The impact of land use on plant biomass of wetlands in lakes and shoals: taking the West Dongting Lake National Nature Reserve as an example[J]. *Journal of central south forestry university*, 2020, 40(1): 123-130.
- [27] 郝文芳, 杜峰, 陈小燕, 等. 黄土丘陵区天然群落的植物组成、植物多样性及其与环境因子的关系[J]. *草地学报*, 2012, 20(4): 609-615.
HAO W F, DU F, CHEN X Y, et al. Plant composition, plant diversity, and their relationship with environmental factors in natural communities in the Loess Hilly Region[J]. *Journal of grassland science and technology*, 2012, 20(4): 609-615
- [28] 郁国梁, 王军强, 马紫荆, 等. 博斯腾湖湖滨湿地优势植物叶片碳、氮、磷化学计量特征的季节动态及其影响因子[J]. *植物资源与环境学报*, 2022, 31(5): 9-18.
YU G L, WANG J Q, MA Z J, et al. Seasonal dynamics and influencing factors of carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometric characteristics of dominant plant leaves in Bosten Lake lakeside wetland[J]. *Journal of plant resources and environment*, 2022, 31(5): 9-18
- [29] 唐玉凤, 李学艳, 程金朋, 等. 昭通龙树河流域废弃稻田湿地植物多样性及群落特征研究[J]. *西南农业学报*, 2021, 34(5): 1088-1095.
TANG Y F, LI X Y, CHENG J P, et al. Study on plant diversity and community characteristics of abandoned paddy field wetlands in the Longshu River Basin of Zhaotong[J]. *Southwest agricultural journal*, 2021, 34(5): 1088-1095
- [30] 刘俊娟. 丹江湿地植物多样性特征及其环境影响因素[J]. *西南农业学报*, 2017, 30(12): 2811-2819.
LIU J J. The characteristics of plant diversity and environmental influencing factors in Danjiang Wetland[J]. *Southwest agricultural journal*, 2017, 30(12): 2811-2819
- [31] 赵琬婧, 王清波, 王瑜, 等. 黑龙江三江自然保护区天然湿地植物物种多样性研究[J]. *湿地科学与管理*, 2018, 14(3): 58-61.
ZHAO W J, WANG Q B, WANG Y, et al. Study on the species diversity of natural wetland plants in Sanjiang Nature Reserve, Heilongjiang Province[J]. *Wetland science and management*, 2018, 14(3): 58-61
- [32] 李耀琪, 王志恒. 植物功能生物地理学的研究进展与展望[J]. *植物生态学报*, 2023, 47(2): 145-169.
LI Y Q, WANG Z H. Research progress and prospects in plant functional biogeography[J]. *Journal of plant ecology*, 2023, 47(2): 145-169
- [33] 杨涛, 王得祥, 周金星, 等. 陕北黄土丘陵沟壑区退耕地植物群落演替规律及物种多样性动态研究[J]. *西北林学院学报*, 2009, 24(5): 10-15.
YANG T, WANG D X, ZHOU J X, et al. Study on the succession pattern and species diversity dynamics of plant communities in abandoned farmland in the loess hilly and gully region of northern Shaanxi[J]. *Journal of northwest forestry university*, 2009, 24(5): 10-15
- [34] 海旭莹, 董凌勃, 汪晓珍, 等. 黄土高原退耕还草地 C、N、P 生态化学计量特征对植物多样性的影响[J]. *生态学报*, 2020, 40(23): 8570-8581.
HAI X Y, DONG L B, WANG X Z, et al. The impact of ecological stoichiometric characteristics of C, N, and P on plant diversity in returning farmland to grassland on the Loess Plateau[J]. *Journal of ecology*, 2020, 40(23): 8570-8581
- [35] 汪殿蓓, 暨淑仪, 陈飞鹏. 植物群落物种多样性研究综述[J]. *生态学杂志*, 2001(4): 55-60.
WANG D B, JI S Y, CHEN F P. A review of research on species diversity in plant communities[J]. *Journal of ecology*, 2001(4): 55-60
- [36] 单元琪, 姚允龙, 张欣欣, 等. 三江平原七星河流域湿地植物多样性及影响因素[J]. *生态学报*, 2020, 40(5): 1629-1636.
SHAN Y Q, YAO Y L, ZHANG X X, et al. Biodiversity and influencing factors of wetland plants in the Qixing River Basin of the Sanjiang Plain[J]. *Journal of ecology*, 2020, 40(5): 1629-1636
- [37] XU C, XIANG W, GOU M, et al. Effects of forest restoration on soil carbon, nitrogen, phosphorus, and their stoichiometry in

- Hunan, Southern China[J].Sustainability, 2018, 10(6):1874.
- [38] 辜翔, 张仕吉, 刘兆丹, 等. 中亚热带植被恢复对土壤有机碳含量、碳密度的影响[J]. 植物生态学报, 2018, 42(5): 595-608.
- GU X, ZHANG S J, LIU Z D, et al. The impact of vegetation restoration in the central subtropical zone on soil organic carbon content and carbon density[J]. Journal of plant ecology, 2018, 42(5): 595-608
- [39] 蒋跃利, 赵彤, 闫浩, 等. 黄土丘陵区不同土地利用方式对土壤微生物量碳氮磷的影响[J]. 水土保持通报, 2013, 33(6): 62-68.
- JIANG Y L, ZHAO T, YAN H, et al. The effect of different land use methods on soil microbial biomass, carbon, nitrogen, and phosphorus in the loess hilly area[J]. Soil and water conservation notification, 2013, 33(6): 62-68
- [40] BRULAND G L, HANCHEY M F, RICHARDSON C J. Effects of agriculture and wetland restoration on hydrology, soils, and water quality of a Carolina bay complex[J]. Wetlands ecology & management, 2003, 11(3): 141-156.
- [41] YU L, HUANG Y, SUN F, et al. A synthesis of soil carbon and nitrogen recovery after wetland restoration and creation in the United States[J]. Scientific reports, 2017, 7(1): 7966.
- [42] BALLANTINE K A, ANDERSON T R, PIERCE E A, et al. Restoration of denitrification in agricultural wetlands[J]. Ecological engineering, 2017, 106: 570-577.
- [43] TOTH L A. Unrealized expectations for restoration of a floodplain plant community[J]. Restoration ecology, 2010, 18(6): 810-819.
- [44] TOTH L A. Invasibility drives restoration of a floodplain plant community[J]. River Research and applications, 2015, 31(10): 1319-1327.
- [45] 王军强, 刘彬, 常凤, 等. 巴音布鲁克新疆假龙胆适生地植物群落物种多样性及其环境解释[J]. 中国草地学报, 2021, 43(3): 29-36.
- WANG J Q, LIU B, CHANG F, et al. Species diversity and of plant communities their environmental interpretation in *Gentiana turkestanorum* habitat in Bayinbuluke, Xinjiang[J]. Chinese journal of grassland, 2021, 43(3): 29-36
- [46] 熊星烁, 蔡宏宇, 李耀琪, 等. 内蒙古典型草原植物叶片碳氮磷化学计量特征的季节动态[J]. 植物生态学报, 2020, 44(11): 1138-1153.
- XIONG X S, CAI H Y, LI Y Q, et al. Seasonal dynamics of carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometric characteristics in leaves of typical grassland plants in Inner Mongolia[J]. Journal of plant ecology, 2020, 44(11): 1138-1153
- [47] XU H, QU Q, LU B B, et al. Response of soil specific enzyme activity to vegetation restoration in the Loess hilly region of China[J]. Catena, 2020, 191: 104564.
- [48] 高国刚, 胡玉昆, 李凯辉, 等. 高寒草地群落物种多样性与土壤环境因子的关系[J]. 水土保持通报, 2009, 23(3): 118-122.
- GAO G G, HU Y K, LI K H, et al. The relationship between species diversity and soil environmental factors in alpine grassland communities[J]. Soil and water conservation notification, 2009, 23(3): 118-122.