

滇西北高原纳帕海湿地植物多样性与土壤肥力的关系

肖德荣¹, 田 昆², 张利权^{1,*}

(1. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062; 2. 国家高原湿地研究中心, 昆明 650224)

摘要:采用植物群落研究法与原状土就地取样技术,研究了滇西北高原典型退化湿地纳帕海植物多样性、土壤养分、酶活性格局特征及其相互关系。随着湿地原生沼泽向沼泽化草甸、草甸的演替,湿地植物群落盖度增加、物种组成增多,群落优势种优势度减小,伴生种数量增加,植物多样性呈增加趋势;湿地土壤有机质、全氮含量不断减少,过氧化氢酶、蛋白酶、蔗糖酶活性增加,脲酶活性降低。植物 α 多样性指数(辛普森、香浓-维纳指数)与湿地土壤有机质、全氮含量呈负相关,与土壤过氧化氢酶、蛋白酶、蔗糖酶活性呈正相关,与脲酶活性呈负相关;土壤有机质、全氮含量与过氧化氢酶、蛋白酶、蔗糖酶活性呈一致负相关,与脲酶活性则成正相关。湿地景观在一定程度上反映了人为生产活动干扰的类型与强度,其植物多样性、土壤养分和酶活性特征及其相互关系是湿地生态系统演替过程中时空间体现,研究结果揭示了人为干扰下湿地退化的生态学过程及机理,可为我国高原湿地生物多样性保护,退化湿地生态恢复与湿地资源可持续利用提供一定的理论依据。

关键词:纳帕海湿地;植物多样性;土壤肥力;土壤酶活性;相关性分析

文章编号:1000-0933(2008)07-3116-09 中图分类号:Q948;S714 文献标识码:A

Relationship between plant diversity and soil fertility in Napahai wetland of Northwestern Yunnan Plateau

XIAO De-Rong¹, TIAN Kun², ZHANG Li-Quan^{1,*}

1 State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China

2 State study Center for Plateau Wetland Research, Kunming 650224, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(7): 3116 ~ 3124.

Abstract: To understand the interactions among soil nutrients, enzyme activities and aquatic plant diversity in a wetland landscape under human disturbances, a three-year study was carried out in the Napahai wetland, a typical degraded plateau wetland in the northwestern Yunnan, China. The plant community composition changed and the community coverage increased over the wetland succession from primary swamp, through swampy meadow, to meadow. The number of associated species increased, while the dominant species abundances decreased. Through succession, the content of soil organic matter and total nitrogen declined. In contrast, the soil enzyme activity of catalase, protease and invertase increased; however urase declined. The Simpson and Shannon-Weiner indices of aquatic plant diversity were both significantly positively correlated with catalase, protease and invertase, and negatively correlated with urase, soil organic matter and total nitrogen. Similarly, soil organic matter and total nitrogen were negatively correlated with catalase, protease and invertase but positively correlated with urase. This wetland succession is thus related to the type and intensity of human disturbances, the

基金项目:国家重点基础研究发展(973)计划资助项目(2003CB415100);上海市科委重大科技攻关资助项目(06dz12302)

收稿日期:2008-01-09; **修订日期:**2008-04-01

作者简介:肖德荣(1973~),男,四川宜宾人,博士生,主要从事湿地生态研究. E-mail: xiaoderong1@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lqzhang@sklec.ecnu.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Basic Research Program of China (973) (No. 2003CB415100); Key Project of Shanghai Scientific and Technological Committee (No. 06dz12302)

Received date: 2008-01-09; **Accepted date:** 2008-04-01

Biography: XIAO De-Rong, Ph. D. candidate, mainly engaged in wetland ecology. E-mail: xiaoderong1@163.com

characteristics of plant diversity, soil fertility and soil enzyme activity. The results from this study will facilitate understanding of the ecological processes and mechanisms contributing to degraded wetlands subject to anthropogenic pressure, and provide guidelines for the assessment of wetland health, sound environmental management and restoration.

Key Words: Napahai wetland; plant species diversity; soil fertility; soil enzyme activity; correlation analysis

云南西北高原湿地位于长江、湄公河等国内和国际重要河流的中上游,对下游水位和水量均衡有着重要的调节作用。该地区湿地的形成与发育与平原湿地不同,与若尔盖高原湿地也存在差异,属我国独特的高原湿地类型。滇西北高原湿地空间异质性小,孤立分散在高原上,周围被高山所包围,相互之间无水系相通,处于闭合和半闭合状态。其独特的地理环境有利于特有物种的分化和古老物种的保存,孕育了丰富的生物多样性,分布着如国家 I、II 级保护鸟类黑颈鹤 (*Grus nigricollis*)、黑鹳 (*Ciconia nigra*)、白马鸡 (*Crossoptilon crossoptilon*)、白琵鹭 (*Platalea leucorodia*) 以及国家 I 级保护的地方特有鱼类中甸叶须鱼 (*Ptychobarbus chungtienensis*)、云贵高原特有的国家 II 级保护种海菜花 (*Ottelia acuminata*) 等珍稀濒危物种,为生物多样性保护的热点区域。同时,这些湿地地处我国少数民族聚集的农牧交错区和旅游热点地带,是当地社会稳定、经济发展的重要物质基础,生物多样性保护与资源利用矛盾较为突出,但国内对这些湿地的研究还较少^[1]。

近年来,由于该地区人口增长,湿地资源遭到不合理的开发利用,致使湿地面积不断萎缩、湿地被分割,加剧了湿地景观的破碎化,威胁着当地生物多样性保护与经济的可持续发展。湿地土壤是植物群落发生、发展的物质基础,植物群落又影响着土壤性质和肥力状况。土壤的性状与植物群落的组成结构和植物群落多样性有着怎样的联系,一直是生态学研究热点^[2],国内外开展了广泛的研究,其研究结果存在差异^[2,3~5]。而这些研究主要针对的是陆生生态系统较小尺度上植物多样性与土壤肥力关系的探讨,而对湿地在较大尺度下不同景观类型植物多样性、土壤肥力格局特征及其相关性的研究不多,对湿地资源利用与保护矛盾较为突出的滇西北高原地区特有湿地类型的研究尤为缺乏。

湿地景观格局是湿地生态系统演替过程中的时空体现,其植物多样性、土壤养分与酶活性特征是对不同湿地环境条件的响应,对其格局特征及关系的研究有利于掌握湿地演化进程中的生态学过程及机理。本研究选取滇西北高原典型退化湿地纳帕海为研究对象,对湿地不同景观中植物多样性,土壤养分、酶活性格局特征及其相互作用关系进行研究,探讨纳帕海湿地在人为干扰下退化的生态学过程及机理,拟为高原湿地生物多样性保护、生态恢复以及湿地资源合理利用提供科学依据。

1 研究区概况

纳帕海位于滇西北横断山脉中段香格里拉县境内(99°37'~99°41'E,27°49'~27°55'N),海拔 3260 m,面积 3100 km²,为我国低纬度高海拔湿地的独特类型(图 1)。该区气候属寒温带高原季风气候区西部型季风气候,全年盛行南风 and 南偏西风,干湿季分明,6~10 月份为明显湿季,11 月~翌年 5 月份为明显干季,降水少、干旱突出;水量补给主要依靠降雨、地表径流、冰雪融水和湖两侧沿断裂带上涌的泉水,湿地区域年均降雨量 619.9 mm,夏季湖水上涨,冬季湖水通过西北角落水洞,潜流 10 km 后汇入金沙江。

纳帕海是许多植物区系成分的交汇区^[6],以温带成分为主,包含了世界广布、旧热带、北温带、东亚、极高山地理成分和淡水湖泊特有植物类型六大地理成分,其中极高山分布种杉叶藻 (*Hippuris vulgaris*) 以该湿地和相邻地区为分布下限,世界广布种水葱 (*Scirpus tabernaemontani*)、莼齿眼子菜 (*Potamogeton maackianus*)、茭草 (*Zizania caduciflora*)、鸭子草 (*Potamogeton tepperi*) 等一些水生植物在这里已达到了其分布的上限,植物多样性极为丰富,但生态环境极其脆弱^[7]。不同湿地景观成土环境条件差异显著,致使纳帕海湿地土壤类型多样,主要为沼泽土和泥炭土,以及排水垦殖后的耕作土。

纳帕海也是滇西北高原国际重要湿地之一,为许多珍稀鸟类如全球 15 种鹤类中唯一生活在高原的国家 I 级保护鸟类黑颈鹤,国家 I 级保护珍稀濒危物种黑鹳等水禽的重要越冬栖息地,是国内外生物多样性保护

关注的热点区域。近年来,随着湿地周边排水垦殖、无序的旅游开发、过度放牧以及周边森林植被的破坏等,致使湿地原生沼泽、沼泽化草甸不断萎缩,退化草甸面积不断扩大,加速了湿地生态系统的退化演替^[8]。

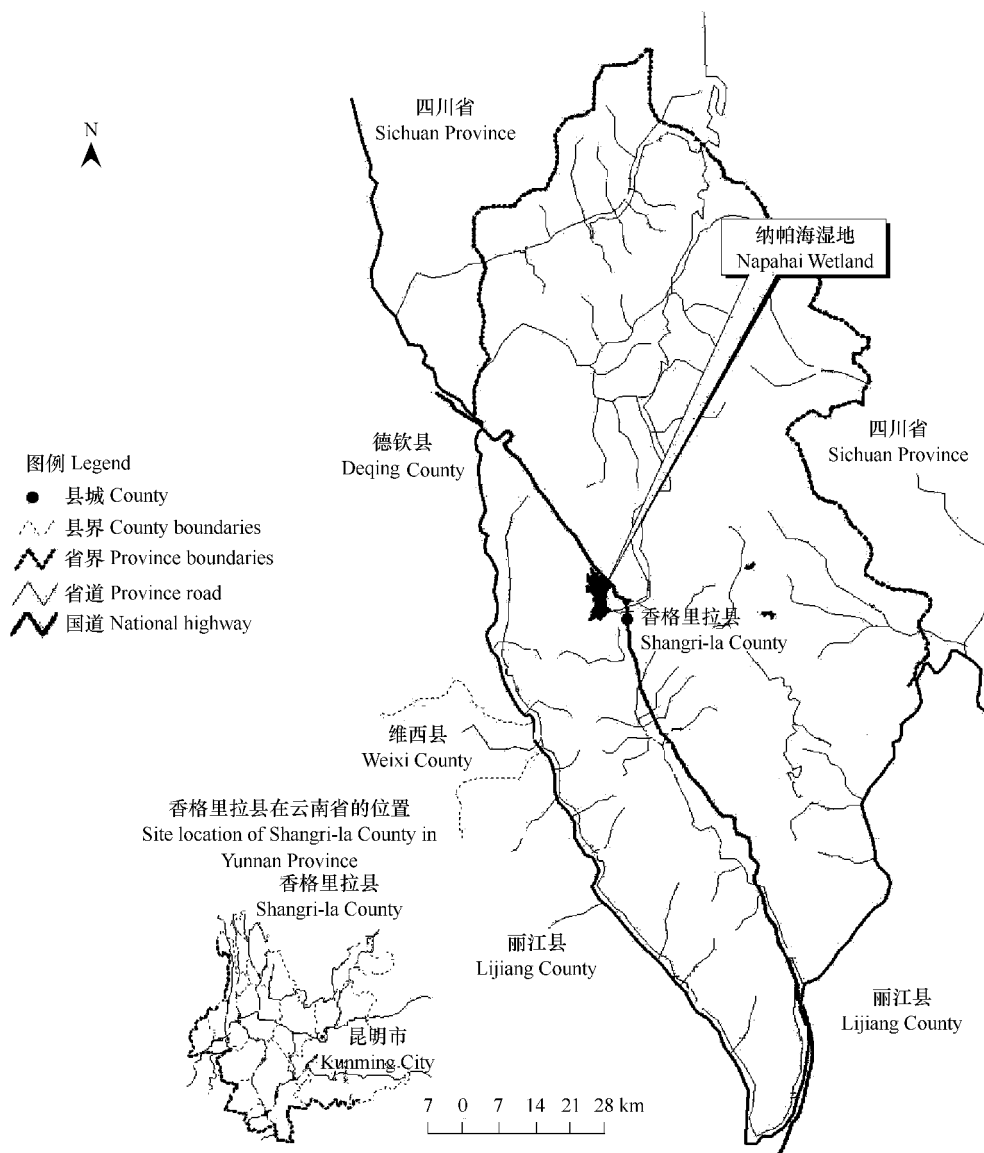


图1 滇西北高原纳帕海湿地位置图

Fig. 1 The location of Napahai wetland of Northwestern Yunnan Plateau

2 研究方法

根据传统湖泊沼泽化理论^[9],结合纳帕海水文、植被类型,将纳帕海划分原生沼泽、沼泽化草甸、草甸3种不同的湿地景观(表1)。

2.1 植物群落调查与多样性分析

纳帕海湿地植物生长期较短,在1998~1999年对纳帕海植被综合考察和2000~2004年对植被变化进行观察记载的基础上,于2005年8月植物生长季采用样方法对纳帕海不同湿地景观植物群落进行野外取样调查,在不同植物群落各个典型地段随机设置10 m×10 m的样地,按对角线取7个1 m×1 m的小样方^[7],分别记录植物种类及数量、盖度等群落特征,其中原生沼泽样地5个、小样方35个,沼泽化草甸样地6个、小样方42个,草甸样地4个、小样方28个。选取美国陆地卫星(LandSat)影像(ETM20001225),经RGB543彩色合成,通过卫星影像目视判读,然后采用TrimbleGPS(精度为0.5 m)在野外对群落调查点定位并对不同湿地景观

进行更新调查,用 ArcGIS9.2 制图(图 2)。植物 α 多样性采用 Simpson 指数和 Shannon-Weiner 指数进行分析。

表 1 纳帕海湿地景观类型及划分方法
Table 1 The landscape types and its dividing methods for Napahai wetland

湿地景观 Wetland landscape	水文 Hydrology	划分方法 Dividing methods 植被类型 Plant types
原生沼泽 Primary swamp	长年淹水水体 water body	沉水、浮叶类植物 Submerged and floating-leaved plant communities
沼泽化草甸 Swampy meadow	雨季淹水,旱季浅水或土壤过湿 Inundation for rainy seasons, shallow water or saturated soil for dry seasons	挺水类植物 Emergent plant communities
草甸 Meadow	常年排水疏干 Drainage	中生、旱生等草甸类植物 Mesic, Xeric meadow plant communities

2.2 土壤取样与分析

2003 ~ 2005 年,应用原状土就地取样技术^[10,11],在纳帕海不同湿地景观设置 4 ~ 5 个定位点,用 TrimbleGPS(精度为 0.5m) 对定位点定位(图 2),连续 3a 在植物生长季节(8 月份)进行土壤取样,取土深度为 0 ~ 20 cm,原生沼泽每次取样为 15 份,沼泽化草甸 21 份,草甸 27 份,样品为混合样并带回实验室内风干、磨碎、过筛,然后保存在冰箱中待测。

按中国分析标准方法^[12]和中国科学院南京土壤研究所的分析方法^[13],设 3 个重复,测定分析土壤样品。土壤有机质采用重铬酸钾法测定^[12,13];全氮采用开氏法测定^[12,13];土壤脲酶采用靛酚比色法测定^[14];过氧化氢酶采用高锰酸钾滴定法测定^[14];蔗糖酶采用 Hofmann 与 Seeger 法测定^[14];蛋白酶采用茚三铜比色法测定^[14]。

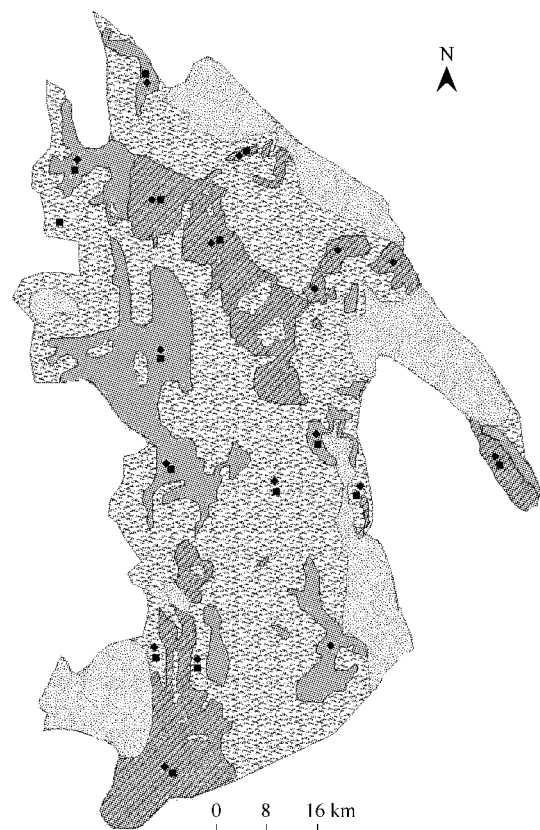
2.3 统计分析

采用 SPSS 13.0 对数据进行统计分析,分析纳帕海植物多样性、土壤肥力格局特征及其相互关系。

3 研究结果

3.1 不同湿地景观植物群落结构及多样性特征

随着原生沼泽向沼泽化草甸、草甸景观的演化,纳帕海植物群落数由 5 个增至 6 个,再减少到 4 个,群落总盖度、伴生种总数(原生沼泽 20 种,沼泽化草甸 30 种,草甸 58 种)总体呈增加趋势,群落层次结构由相对复杂的水生层次(挺水层、浮叶层、沉水层)向较为单一的陆生草本层次演化(表 2)。这表明,随着原生沼泽、沼泽化草甸等湿地景观的萎缩,湿地水文条件的不断丧失,湿地生态系统结构和功能核心的水生植物群落结构迅速改变或丧失,必将影响湿地生态系统功能的正常发挥。



图例 Legend
◆ 植物群落调查点 Location of plant survey
■ 土壤采样点 Location of soil sampling
■ 原生沼泽 Primary swamp
■ 垦后湿地 Reclaimed wetland
■ 沼泽化草甸 Swampy meadow
■ 草甸 Meadow

图 2 植物群落调查点及土壤定位点示意图
Fig. 2 The sketch map showing the wetland landscape types and the location of plant community survey and soil sampling

表 2 不同湿地景观植物群落结构特征

Table 2 Characteristic of community compositions of different wetland landscape

湿地景观 Wetland landscape	群落名称 Community	群落盖度(%) Coverage	伴生种数量 Accompanion	群落层次 Community structure		
				挺水层 Emergent	浮叶层 Floating-leaved	沉水层 Submerged
原生沼泽 Primary swamp	穗状狐尾藻群落 <i>Com. Myriophyllum spicatum</i>	< 80	7			√
	马来眼子菜群落 <i>Com. P. malainus</i>	60 ~ 90	8		√	√
	金鱼藻群落 <i>Com. Ceratophyllum demersum</i>	40 ~ 75	5		√	√
	鸭子草群落 <i>Com. Potamogeton tepperi</i>	80 ~ 100	6	√	√	√
	茳茳群落 <i>Com. Nymphaoides peltatum</i>	80 ~ 100	11		√	√
合计 Total			20			
沼泽化草甸 Swampy meadow	杉叶藻群落 <i>Com. Hippuris vulgaris</i>	30 ~ 40	6	√		√
	茭草群落 <i>Com. Zizania caduciflora</i>	30 ~ 50	4	√		√
	水葱群落 <i>Com. Scirpus tabernaemontani</i>	60 ~ 90	10	√		√
	水蓼群落 <i>Com. Polygonum hydropiper</i>	< 60	8	√		√
	华扁穗草-无翅苔草群落 <i>Com. Blysmus Sinocompressus-Carex pleistogyna</i>	85	8	√		√
	刘氏荸荠群落 <i>Com. Eleocharis liouana</i>	50 ~ 80	6	√		√
合计 Total			30			
草甸 Meadow	鹅绒菱陵菜群落 <i>Com. Potentilla anserine</i>	95	26	—	—	—
	斑唇马先蒿群落 <i>Com. P. longiflora var. tubiformis</i>	90	24	—	—	—
	尼泊尔酸模群落 <i>Com. Rumex nepalensis</i>	85	12	—	—	—
	发草-矮地榆群落 <i>Com. Deschampsia caespitosa-Sanguisorba filiformis</i>	95	7	—	—	—
合计 Total			58			

纳帕海不同湿地景观植物物种在科、属、种多样性组成数以及植物 α 多样性指数(辛普森指数和香浓-维纳指数)表现为原生沼泽 < 沼泽化草甸 < 草甸,随原生沼泽景观向沼泽化草甸、草甸景观的演替湿地植物多样性呈一致增加趋势(表 3)。这表明纳帕海湿地在原生沼泽景观向沼泽化草甸、草甸景观演替进程中,水生优势种如沉水、浮叶及挺水植物的优势度明显下降,单优水生多层次植物群落结构被群落结构单一的草甸植物所取代,水生、湿生植物物种减少,中生的草甸植物物种增多,植物群落物种间竞争加剧、物种生态位进一步分化。湿地沉水、浮叶、挺水植物多样性消失,草甸中生类植物多样性增加,虽然草甸植物多样性增加,但多样性性质改变,为湿地生态系统功能退化的特征体现。

表 3 不同湿地景观植物科、属、种组成及 α 多样性Table 3 Numbers of plant family, genus, species and its α diversity in different wetland landscape

项目 Item	原生沼泽 Primary swamp	沼泽化草甸 Swampy meadow	草甸 Meadow
科 Family	16	19	28
属 Genus	17	26	55
种 Species	25	36	63
Simpson 指数 Simpson index	0.7604	0.8156	0.8329
Shannon-Weiner 指数 Shannon-Weiner index	1.9103	1.9372	1.9838

3.2 不同湿地景观土壤肥力特征

纳帕海不同湿地景观其土壤有机质、全氮含量不同。原生沼泽土壤有机质、全氮含量最高(分别为 10.48%, 2.79 gkg⁻¹),其次为沼泽化草甸(分别为 6.50%, 1.64gkg⁻¹),草甸土壤有机质、全氮含量最低(分别为 3.14%, 1.22gkg⁻¹)(表 4)。这主要是原生沼泽常年淹水,土壤光照与通气条件差而致使土壤泥炭化、潜

育化作用占据主导,湿地有机质矿质化过程较弱而营养不断积累;草甸常年排水疏干,土壤光照与通气条件改善,加速了有机质的矿质化作用,土壤营养不断分解而减少;沼泽化草甸土壤光照与通气条件介于原生沼泽与草甸之间,其土壤有机质与全氮含量居二者之间。这表明随着原生沼泽向沼泽化草甸、草甸景观的转化,湿地碳汇功能逐渐退化甚至丧失,湿地由碳汇逐步转化为碳源,增加 CO₂ 等温室气体的排放,将引起新的环境问题。

表 4 不同湿地景观土壤养分与酶活性格局特征(平均值±标准差)

Table 4 Changes of soil nutrients and enzymic activities in different wetland landscape (Mean ± S. E)

项目 Item	原生沼泽 Primary swamp	沼泽化草甸 Swampy meadow	草甸 Meadow
有机质含量 Organic matter (%)	10.48 ± 0.45	6.50 ± 0.23	3.14 ± 0.15
全氮含量 Total nitrogen (g kg ⁻¹)	2.79 ± 0.28	1.64 ± 0.06	1.22 ± 0.33
过氧化氢酶活性 Catalase (mL·g ⁻¹)	0.19 ± 0.02	0.21 ± 0.02	0.34 ± 0.01
蛋白酶活性 Protease (mg·g ⁻¹)	0.46 ± 0.06	21.55 ± 1.15	50.40 ± 2.31
脲酶活性 Urase (mg·g ⁻¹)	61.71 ± 1.25	57.89 ± 1.25	41.96 ± 1.50
蔗糖酶活性 Invertase (mL·g ⁻¹)	1.35 ± 0.14	15.52 ± 1.46	36.82 ± 1.61

纳帕海湿地土壤过氧化氢酶、蛋白酶、蔗糖酶等酶活性随着原生沼泽景观向沼泽化草甸、草甸景观转化一致增加,而脲酶呈减小趋势(表 4)。这可能是随着湿地景观的演化,土壤光照和通气条件的改善,植物多样性增加,促进了土壤微生物的增值,而土壤微生物数量决定了进入土壤中酶的数量及活性,而致使土壤过氧化氢酶、蛋白酶、蔗糖酶活性增加,而脲酶可能是草甸受到了较为严重的土体污染而活性降低。

3.3 植物多样性与土壤肥力的相关性

纳帕海植物 α 多样性指数(辛普森指数和香浓-维纳指数)随着土壤养分有机质、全氮含量的逐渐减少而不断增加,随土壤过氧化氢酶、蛋白酶、蔗糖酶活性的增加,脲酶活性的减弱而增加(表 3、4)。

植物多样性、土壤养分及酶活性的相关性分析结果表明三者之间存在一定的相关性(表 5),土壤有机质、

表 5 植物多样性指数与土壤肥力的相关性

Table 5 Correlation coefficients between plant species diversity index and soil fertility

项目 Item	SI	SWI	OM(%)	TN (g kg ⁻¹)	Ca (mL·g ⁻¹)	Pr (mg·g ⁻¹)	Ur (mg·g ⁻¹)	In (mL·g ⁻¹)
SI	1	0.9019	-0.9703	-0.9995 *	0.7689	0.9277	-0.8060	0.9177
SWI		1	-0.9796	-0.9148	0.9697	0.9979	-0.9826	0.9993
OM(%)			1	0.9773	-0.9008	-0.9905 *	0.9253	-0.9865 *
TN (g·kg ⁻¹)				1	-0.7883	-0.9388	0.8239	-0.9295
Ca (mL·g ⁻¹)					1	0.9520	-0.9982 *	0.9597
Pr (mg·g ⁻¹)						1	-0.9690	0.9997 *
Ur (mg·g ⁻¹)							1	-0.9749
In (mL·g ⁻¹)								1

* : $p < 0.05$; * SI: 辛普森指数 Simpson index; SWI: Shannon-Weiner 指数 Shannon-Weiner index; OM: 有机质含量 Organic matter; TN: 全氮含量 Total nitrogen; Ca: 过氧化氢酶活性 Catalase; Pr: 蛋白酶活性 Protease; Ur: 脲酶活性 Urase; In: 蔗糖酶活性 Invertase

全氮与植物多样性呈负相关,其中全氮含量与辛普森指数达显著相关水平($p < 0.05$);过氧化氢酶、蛋白酶、蔗糖酶活性与植物多样性指数成一致的正相关,而脲酶活性与植物多样性指数呈负相关;土壤肥力与酶活性同样存在显著相关性,土壤有机质、全氮含量与过氧化氢酶、蛋白酶、蔗糖酶活性呈一致的负相关,其中有机质与蛋白酶、蔗糖酶达显著相关($p < 0.05$)水平,而土壤有机质、全氮含量与脲酶活性则称正相关。

4 讨论

4.1 植物多样性与土壤肥力的相互关系

植物生长发育受土壤养分条件的制约,土壤环境的差异会导致群落演替过程中物种多样性的变化。有研究表明土壤肥力水平与热带植物群落物种多样性之间存在着显著相关关系^[4],植物群落的物种多样性随着

土壤肥沃程度的增加而增加^[15],也有研究证实了在小尺度内可利用的土壤养分和植物多样性呈负相关^[16]。本研究结果表明纳帕海植物多样性随湿地土壤有机质、全氮含量的减少而增加,呈负相关关系,这与有关学者对陆生生态系统土壤营养与物种多样性相关性研究结果相似^[16]。这是因为原生沼泽常年淹水,土壤全量养分处于相对封闭状态,尽管土壤有机质、全氮含量很高,但不利于植物的吸收利用,仅适于少数适生物种的生长而形成单优群落,致使植物多样性低;随着纳帕海原生沼泽向沼泽化草甸到草甸的演替,湿地淹水环境不断丧失,土壤通气性增加,使湿地表层土壤处于干燥的氧化还原环境而有利于有机质矿化,同时,植物个体和植物种间对土壤有限资源的竞争,成为影响植物群落物种组成和群落动态的关键因素^[17],限制了优势物种的发展,使得更多的物种共存、物种多样性增加^[18]。研究表明,湿地土壤肥力与植物多样性存在相关,湿地土壤肥力对植物多样性有着重要的维持作用。

土壤养分也将随着植被的演变而发生改变。纳帕海植物多样性随原生沼泽向沼泽化草甸、草甸的演替而增加,植物群落种类多样化和结构复杂化增加,加速土壤中物质的分解率和生物归还率,促进了湿地土壤物质循环^[2,19],使得土壤有机质、全氮含量随植物多样性的增加而呈减少趋势。本研究仅对土壤全量养分与植物多样性关系进行了研究,要进一步认识湿地土壤养分与植物多样性的相互关系,需进一步研究植物多样性与土壤速效养分的关系。

土壤酶系主要来源于动植物的分泌及其残体的腐解和微生物的分泌等^[14],植物可直接或间接地影响土壤酶的含量^[20,21],植物群落的物种多样性和物种种类组成与土壤酶活性密切相关^[22]。一方面,凋落物的腐解能释放酶进入土壤中,从而提高土壤酶活性^[14];另一方面,由于凋落物中生物区系的变化,尤其是微生物数量和活性的升高,凋落物和土壤中的酶活性也会升高^[23]。纳帕海植物多样性随原生沼泽向沼泽化草甸、草甸演替而不断增加,物种数增多、物种改变使得其根系分泌物和枯落物的质和量就不同,以及沼泽化草甸、草甸景观土壤水热条件改善,从而引起土壤酶活性的差异^[3],致使湿地土壤酶活性不断增加,而脲酶活性减弱可能是人为干扰下对土体污染的影响所导致的^[24],其生态学过程需进一步深入研究。

土壤酶是生物化学过程的积极参与者,其活性反应了土壤中进行的各种生物化学过程的动向和强度^[25],在物质循环和能量流动过程中扮演着重要的角色。酶活性升高有利于凋落物和土壤有机物质的分解、转换和养分元素的释放,对土壤肥力和维持生态系统的物质循环和能量流动具有重要意义^[22]。纳帕海湿地土壤酶活性随原生沼泽景观向沼泽化草甸、草甸景观的转化而增加,加速了土壤有机物的分解、转化和养分的释放,有利于不同植物物种的生长、共存,致使植物多样性增加。这进一步体现了湿地植物多样性与土壤酶活性之间极其复杂的生态作用关系。

4.2 人类活动干扰对植物多样性与土壤肥力关系的影响

近年来,纳帕海湿地受到排水垦殖、过度放牧、无序旅游以及周边森林破坏等人为生产活动的严重干扰,对湿地植被、土壤性状产生较大影响,进而影响到植物多样性与土壤肥力的关系。研究表明排水垦殖加速了纳帕海湿地的不断萎缩,近 24a 来沼泽面积损失达 69%,大量沉水、浮叶等水生植物物种不断减少甚至消失,挺水植物与草甸植物类群增多而占据湿地大部分面积^[7],湿地植物多样性性质改变。随着纳帕海水文条件的不断丧失,沼泽土壤泥炭化、潜育化过程减弱或终止,土壤表层处于较干燥的氧化环境下而利于有机质矿化,导致土壤全氮及有机质含量随原生沼泽向沼泽化草甸、草甸演替而减少,从而改变了湿地植物生长环境条件,影响了植物的生长发育与多样性。无序旅游中马匹(高峰期马匹超过 1000 余匹)的践踏以及粪便和所产生垃圾的污染造成纳帕海水质变劣,浅水沼泽水体极为污浊,透明度变小,而且地面水的细菌和大肠杆菌群两个指标严重超标,与相邻的碧塔海和属都湖湿地相比高出几十至几百倍^[7]。同时马匹和人的过度践踏导致土壤表层物理性状改变,增加土壤紧实度^[30],破坏了沼泽土和泥炭土的草根层,加速了有机质分解,促进了矿化作用,导致沼泽土壤养分含量衰减下降,同样影响了植物生长的土壤环境条件而改变植物多样性。纳帕海畜牧业的发展大大超过了其自身的载畜容量,当前超载率达 377.73%^[30]。由于牲畜对优质牧草的过度采食降低了湿地植物物种丰富度,同时也改变了物种间竞争关系而导致多样性组成改变^[31]。而且过度放牧引起

沼泽土壤生态系统物质循环中有机物质的归还量减少,影响腐殖质积累,干扰和破坏了土壤生态系统正常的物质循环,也影响到了土壤肥力特征而影响到植物的生长与物种间的竞争关系。汇水区森林植被对纳帕海湿地具有重要的涵养功能。汇水区森林植被的破坏使得水土流失加剧,表土、养分和有害物质随地表径流进入纳帕海沉积,加速了纳帕海湿地的陆地化进程^[32],从而影响了湿地植物多样性、土壤肥力格局特征及其相互关系。可见,人为干扰类型与强度的差异对湿地植物多样性、土壤肥力格局特征及其相互关系具有不同的生态作用。在湿地生物多样性保护与退化湿地生态恢复实践中,要充分考虑湿地区人为干扰的类型、强度,采取相应措施,减少或排除人为干扰,实现湿地生物多样性保护与资源的可持续开发利用。

5 结论

本研究是对纳帕海湿地植物多样性与土壤肥力关系的初步探讨,研究结果表明湿地生态系统有着较陆生生态系统更为复杂而脆弱的结构和功能特征,其植物多样性与土壤肥力之间存在极其复杂的作用关系。人为生产活动的干扰加剧了湿地景观的演替进程,加深了不同湿地景观间环境条件的差异,人为干扰类型与强度对植物多样性、土壤肥力及其相互关系的影响存在一定差异,对湿地植物、土壤肥力产生直接或间接的干扰,影响了三者的空间格局特征及其相互关系。研究结果进一步揭示了湿地退化演替过程中植物-土壤系统相互作用的生态学过程及机理,在湿地生态系统保护与退化湿地生态系统恢复实践中,应深入研究湿地生态因子间的相互关系及作用机理,把握关键生态因子,从生态系统完整性和充分考虑人为干扰类型与强度作用的基础上,实现湿地的保护和生态恢复。

References:

- [1] Yin Y, Fang N Q, Hu Ch Y, *et al.* Palaeoenvironmental evolution deduced from organic carbon stable isotope compositions of Napahai lake sediments, Northwestern Yunnan, China. *Journal of Lake Science*, 2001, 14(4): 289—295.
- [2] Yang X B, Zhang T L, Wu Q S. The relationship between biodiversity and soil fertility characteristics on abandoned fields in the tropical region of southern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(2): 190—196.
- [3] Yang W Q, Zhong Z C, Tao J P, *et al.* Study on relationship between soil enzymic activities and plant species diversity in forest ecosystem of MT. Jinyun. *Scientia Silvae Sinicae*, 2001, 37(4): 124—128.
- [4] Brosnoff K D, Chen J, Crow T R. Understory vegetation and site factors: Implications for a managed Wisconsin landscape. *For Ecol Man*, 2001, 146: 75—87.
- [5] Gentry A H. Changes in plant community diversity and floristic composition on environmental and geographical gradients. *Ann Missouri Bot Gard*, 1988, 75: 1—34.
- [6] Yunnan Institute of Forestry Inventory and Planning (Nature Protection Zones in Yunnan). The plateau lake ecosystem type in nature protection zone — Napahai Nature Protection Zone. Beijing: China Forestry Press, 1989. 273.
- [7] Xiao D R, Tian K, Yuan H, *et al.* The distribution patterns and changes of aquatic plant communities in Napahai Wetland in northwestern Yunnan Plateau, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(11): 3624—3630.
- [8] Tian K, Lu M, Chang F L, *et al.* The Ecological environment degradation and degradation mechanism of Napahai Karst wetland in southwest Yunnan Plateau. *Journal of Lake Sciences*, 2004, 16(1): 35—42.
- [9] Lang H Q, Zu W Ch, Jin Shu R. *China Marsh Study*. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 1983. 11: 168—174.
- [10] Tian K, Chen B K, Bei R T, *et al.* Application of *in-situ* technique to study N fluxes on degraded soils. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(9): 1937—1943.
- [11] Raison R J, Connell M J, Khanna P K. Methodology for studying fluxes of soil mineral-N *in situ*. *Soil Biol Biochem*, 1987, 19(5): 521—530.
- [12] Liu G S. *Soil physical and chemical analysis & description of soil profiles*. Beijing: Standards Press of China, 1996. 31—37.
- [13] The Institute of Soil Science, CAS. *Analysis of Soil Physical and Chemical Characteristics*. Shanghai: Shanghai scientific & Technical Publishers, 1987. 62—93, 132—135.
- [14] Guan S Y. *Soil Enzyme and Study Methods*. Beijing: Agriculture Press, 1986. 206—239.
- [15] Gentry A H. Changes in plant community diversity and floristic composition on environmental and geographical gradients. *Ann Missouri Bot Gard*, 1988, 75: 1—34.
- [16] Rosenzweig M L. *Species Diversity in Space and Time*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.

- [17] Bart F, Hans De K, Frank B. Soil nutrient heterogeneity alters competition between two perennial grass species. *Ecology*, 2001, 82: 2534—2546.
- [18] Patrick R, Strawbridge D. Variation in the structure of natural diatom communities. *America. Nature*, 1963, 51—57.
- [19] Bormann B T, Sidle R C. Change in productivity and distribution of nutrients in chronosequence at Glacier Bay, national Park, A laska. *J. Ecology*, 1990, 78: 561—578.
- [20] Castellano S D, Dick R P. Influence of cropping and sulfur fertilization transformations of sulfur in soils. *Soil Sci Soc Am J*, 1991, 283—285.
- [21] Dick R P, Deng S. Multivariate factor analysis of sulfur oxidation anrhodanese activity in soils. *Biogeochemistry*, 1991, 12: 87—101.
- [22] Yang W Q, Wang K Y. Advances in Forest Soil Enzymology. *Scientia Silvae Sinicae*, 2004, 40(2): 152—159.
- [23] Dilly O, Munch J C. Microbial biomass content, basal respiration and enzyme activities during the course of decomposition of leaf litter in a black alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) forest. *Soil Biology & Biochemistry*, 1996, 28: 1073—1081.
- [24] Yang C L, Sun T H, He W X, *et al.* Effects of Hg on soil enzyme activity. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(3): 620—624.
- [25] He B, Wen Y G, Yuan X, *et al.* Studies on soil physical and chemical properties and enzyme activities of different mangrove communities in Yingluo Bay of Guangxi. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, 38(2): 21—26.
- [26] Kobayashi T, Hori Y and Nomoto N. Effects of trampling and vegetation removal on species diversity and microenvironment under different shade conditions. *Journal of Vegetation Science*, 1997, 8(6): 873—880.
- [27] Xiao D R, Tian K, Yang Y M, *et al.* The plant diversity pattern and its driving forces in Napahai, a plateau degraded wetland in northwestern Yunnan. *China. Ecology and Environment*, 2007, 16(2): 523—529.

参考文献:

- [1] 殷勇, 方念乔, 胡超涌, 等. 云南中甸纳帕海古环境演化的有机碳同位素记录. *湖泊科学*, 2001, 14(4): 289~295.
- [2] 杨晓波, 张桃林, 吴庆书. 海南琼北地区不同植被类型物种多样性与土壤肥力的关系. *生态学报*, 2002, 22(2): 190~196.
- [3] 杨万勤, 钟章成, 陶建平, 等. 缙云山森林土壤酶活性与植物多样性的关系. *林业科学*, 2001, 37(4): 124~128.
- [6] 云南省林业调查规划院. 高原湖泊生态系统类型的自然保护区——纳帕海自然保护区, 云南自然保护区. 北京: 中国林业出版社, 1989. 273.
- [7] 肖德荣, 田昆, 袁华, 等. 高原湿地纳帕海水生植物群落分布格局及变化. *生态学报*, 2006, 26(11): 3624~3630.
- [8] 田昆, 陆梅, 常凤来, 等. 云南纳帕海岩溶湿地生态环境变化及驱动机制. *湖泊科学*, 2004, 16(1): 35~42.
- [9] 郎惠卿, 祖文辰, 金树仁. 中国沼泽. 济南: 山东科学技术出版社, 1983. 11: 168~174.
- [10] 田昆, 陈宝昆, 贝荣塔, 等. *In-situ* 方法在研究退化土壤氮库时空变化中的应用. *生态学报*, 2003, 23(9): 1937~1943.
- [12] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述. 北京: 中国标准出版社, 1996. 31~37.
- [13] 中国科学院南京土壤所. 土壤理化性质分析. 上海: 上海科技出版社, 1987. 62~93; 132~135.
- [14] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986. 206~239.
- [22] 杨万勤, 王开运. 森林土壤酶的研究进展. *林业科学*, 2004, 40(2): 152~159.
- [24] 杨春璐, 孙铁珩, 和文祥, 等. 汞对土壤酶活性的影响. *应用生态学报*, 2007, 18(3): 620~624.
- [25] 何斌, 温远光, 袁霞, 等. 广西英罗港不同红树植物群落土壤理化性质与酶活性的研究. *林业科学*, 2002, 38(2): 21~26.
- [27] 肖德荣, 田昆, 杨宇明, 等. 高原退化湿地纳帕海植物多样性格局特征及其驱动力研究. *生态环境*, 2007, 16(2): 523~529.