

豫东黄河故道湿地土壤生物学性状及土壤质量评价

朱新玉¹, 胡云川², 芦杰¹

(1. 商丘师范学院 环境与规划学院, 河南 商丘 476000; 2. 商丘师范学院 生命科学学院, 河南 商丘 476000)

摘要:以豫东黄河故道湿地为研究对象,采用野外采样和室内分析相结合的方法,测定土壤有机质、土壤微生物量碳氮、土壤基础呼吸、土壤酶活性和土壤动物群落指标等 14 个生物学指标,运用数学统计方法,对不同类型湿地土壤的生物质量进行综合评价。结果表明,故道湿地不同利用类型土壤生物学性质和土壤动物群落多样性差异显著($p < 0.05$),其排列顺序为:林地湿地>湿草地>沼泽湿地>盐碱滩地。主成分分析得到 2 个主成分,累计方差贡献率高达 98.651%;其中,土壤肥力和土壤酶活性、土壤动物群落指标在主成分上的载荷较高,可作为黄河故道湿地土壤的特征生物学指标,在一定程度上可反映土壤质量的变化情况。主成分综合得分表明林地湿地土壤质量最高,盐碱滩地最低。土壤有机质、土壤微生物量、土壤酶活性和土壤动物群落多样性四类指标可作为黄河故道湿地土壤质量评价的特征生物指标。

关键词:黄河故道; 土壤质量; 湿地; 主成分分析

中图分类号:S153.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2014)02-0027-06

Evaluation on Soil Biological Characteristics and Quality of the Wetlands in Ancient Bed of Yellow River of East He'nan Province

ZHU Xin-yu¹, HU Yun-chuan², LU Jie¹

(1. College of Environment and Planning, Shangqiu Normal University, Shangqiu, He'nan 476000, China;

2. College of Life Science, Shangqiu Normal University, Shangqiu, He'nan 476000, China)

Abstract: In order to evaluate the quality of different wetland use patterns, by using field sampling and laboratory analysis, fourteen soil biological indices, including soil organic matter, soil microbial biomass, soil respiration, soil enzyme activity and community of soil fauna were studied in the east part of the Yellow River wetland. The results showed that soil biological indices and diversity of soil fauna community had significant differences among different land use patterns ($p < 0.05$). The order was in the sequence of forest wetland > humid grasslands > marsh wetland > saline-alkali wasteland. The principal components which accounted for 98.651% of cumulative variance were extracted from the raw data. Soil fertility and soil enzyme activity indices, soil fauna community index had the high load on the principal components, which can be used as biological indicators of soil characteristics in the Yellow River wetland, and these indices can reflect the changes of soil quality of wetland. The chief principal component scores indicated that forest wetland biological quality was the best and saline-alkali wasteland was the worst. The four biological indices including soil organic matter, soil microbial biomass, soil enzyme activity and diversity of soil fauna community could be used to evaluate the changes of soil quality of the Yellow River wetland.

Key words: ancient bed of Yellow River; soil quality; wetland; principal component analysis

湿地生态系统是介于水、陆生态系统之间的一类生态单元,具有水域和陆地生态系统的特点,是地球最富有生产力的生态系统之一^[1-2]。近年来,由于人类对湿地资源的不合理利用造成湿地生态系统功能

退化,使湿地土壤生物性状及土壤生物质量状况成为当前湿地研究的热点之一^[3]。土壤生物在土壤形成发育及地上植被生长方面起着主导作用,在指示土壤环境变化时反映敏感^[4]。相关研究指出,土壤生物学

收稿日期:2013-08-21

修回日期:2013-09-21

资助项目:教育部人文社会科学研究青年基金项目“黄河故道湿地土壤质量生物指标研究”(13YJCZH283);河南省科技厅科技攻关项目(132102310357);商丘师范学院青年科研基金(2011QN21)

作者简介:朱新玉(1981—),女,河北邱县人,博士,副教授,主要从事土壤环境学和土壤动物生态等方面研究。E-mail:tia20021201@163.com

性质可作为早期预警指标指示土壤生产力和土壤质量的变化情况^[5]。土壤生物学指标在土壤质量变化评价、生态系统恢复及管理方式等方面具有潜在优势^[6]。以往对土壤生物学性质的研究涉及到土壤生物部分,大部分是对土壤微生物的研究^[7-8],较少涉及到土壤动物^[6];而土壤动物作为一类群体,以其复杂的功能群,通过对营养物质的转化、储存和释放等方式影响着土壤质量^[9-10]。Fu等^[11]和Bernard等^[12]研究表明土壤动物与土壤质量之间关系密切,且土壤动物被认为土壤生态系统变化的早期预警及敏感指标。

在土壤生物学指标中,土壤酶活性参与了土壤的发生、发育以及土壤肥力的形成和演化全过程,反映了土壤中一切生物化学过程的方向和强度,是评价土壤质量的重要生物学指标^[13-14]。湿地土壤酶的活性和存在的状态被普遍认为是湿地生态系统中有有机质分解转化过程的关键,控制着湿地生态系统的物质循环^[15]。研究指出土壤酶活性与土壤养分之间具有较好的线性关系,可作为敏感的生物学指标评价土壤质量^[16]。刘云鹏等^[13]研究指出,土壤酶活性反映出土壤肥力水平的高低,可作为评价湿地土壤肥力质量的生物学指标。

上述研究表明,土壤生物学性质与土壤质量的关系密切,涉及到湿地土壤生物学性状及利用土壤生物学指标,并结合土壤动物群落多样性指标来评价湿地土壤质量方面的研究尚不多见。豫东黄河故道湿地位于黄河下游冲积扇的脊轴,经过长期的自然变迁,形成大面积的湿地,成为野生动物的觅食、停歇和越冬地,已受到学者们的关注^[17],但其基本生物学性状和湿地土壤质量尚不清楚。鉴于此,本文以豫东黄河故道湿地为研究对象,探讨湿地土壤生物学性质和土壤动物群落多样性变化规律;利用统计方法,在土壤生物性质的基础上,结合土壤动物群落多样性指标,从另一个角度阐述黄河故道湿地土壤质量状况,以期为黄河故道湿地恢复提供土壤动物学方面的基础资料及为湿地土壤质量生物评价指标的选取提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究地位于河南省与山东省接壤区,西起民权县睢州坝,东至虞城县小乔集,北邻豫鲁省界,南北以黄河故堤为界。全长134.6 km,面积约1 520 km²,为明清时期古黄河水道遗留下地一段洼地;地理位置位于115°47′—116°17′E,34°50′—34°33′N,整体走向为西北—东南走向,呈带状分布。

黄河故道湿地属于暖温带半湿润大陆性季风气候,

年均气温13.9~14.3℃,最高均气温27.0~27.5℃,极端最高温43.6℃;最低均气温-0.6~1.0℃,极端最低温-23.4℃;无霜期约210 d,年降水量686.5~872.9 mm。调查区属洪泽湖水系,由山东省单县大姜庄南入安徽省砀山经徐州后入淮河。历代由于黄河的多次泛滥和改道,及地下水位不断上升,发育了众多湿地。主要类型为盐碱滩地、沼泽湿地、湿草地、水洼地和林地湿地;湿地土壤多为古黄河冲积沙土或砂壤土。植被类型以草本植物为主,乔木主要有山杨(*Populus davidiana*)、柳树(*Salix babylonica*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、泡桐(*Pau-
lownia*)等,灌木主要以野生怪柳(*Tamarix chinensis*)林为主。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与样品采集 样地选择是在野外植物调查的基础上,依据主要植物群落空间分布特征,利用相关地形林相图及遥感资料,在研究区内设置了盐碱滩地(saline-alkali wasteland, SAW)、湿草地(humid grasslands, HG)、沼泽湿地(marsh wetland, MW)和林地湿地(forest wetland, FW)4种地类型;于2012年采集土壤样品,每个样点选取3个剖面,分0—20 cm和20—60 cm两层取样,每个样地设3次重复。将采集的土样拣出所有可见碎石、植物残体和根系后,将所有样品用四分法混匀装袋,用冰盒运输并保存于4℃冰箱中待用。

土壤动物取样面积为50 cm×50 cm,分3层采样,即0—5 cm,5—10 cm,10—15 cm。土壤动物分别采用手拣法、改良的干湿漏斗法分离提取,依据《中国土壤动物检索图鉴》^[18]、《幼虫分类学》^[19]进行显微镜下分析鉴定,同时记录个体数量,最后将4种湿地类型的土壤动物进行综合,得到豫东黄河故道湿地土壤动物的区系分布特征。

1.2.2 测定项目与方法 土壤有机质(SOM)用重铬酸钾氧化—比色法测定^[20];土壤微生物生物量碳(MBC)采用氯仿熏蒸 K₂SO₄ 浸提—TOC 仪测定法测定^[21];土壤微生物生物量氮(MBN)采用氯仿熏蒸浸提—碱性过硫酸钾氧化比色法测定^[21];土壤呼吸(SR)采用室内密闭静态碱液吸收法测定,以单位时间土壤呼出的CO₂计^[22];土壤脲酶活性(SUR)采用靛酚蓝比色法测定,以24 h后1 g土壤中NH₃-N的毫克数表示;土壤碱性磷酸酶活性(SAP)采用氯代二溴对苯醌亚胺比色法测定,以24 h后1 g土壤中释放出的酚的毫克数表示;土壤过氧化氢酶活性(SC)采用高锰酸钾滴定法测定,以单位时间内土壤消耗的0.1 mol/L高锰酸钾计;土壤蔗糖酶活性(SI)采用

3,5—二硝基水杨酸比色法测定,以 24 h 后 1 g 土壤中葡萄糖的毫克数表示;以上酶活性的测定方法参照关松荫的方法^[23]。

1.2.3 数据处理

(1) Shannon-Wiener 指数(H')^[24]:

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \lg P_i$$

式中: S ——所有的物种数; P_i ——第 i 个物种的多度比例。

(2) Pielou 均匀度指数(E)^[24]:

$$E = H' / \ln S$$

式中: S ——所有的物种数; H' ——多样性指数。

(3) Simpson 优势度指数(C)^[24]:

$$C = \sum_{i=1}^S n_i / N$$

式中: S ——所有的物种数, n_i ——第 i 种的个体总数; N ——所有物种的个体总数。

(4) 密度—类群指数(DG)^[24]:

$$DG = (g/G) \sum (D_i C_i / D_{imax} C)$$

式中: D_i ——第 i 类群的密度; D_{imax} ——各群落中第 i 类群的最大密度; C_i/C ——群落中第 i 个类群出现的比率; g ——群落中类群数; G ——各群落所包含的总类群数,每个类群在各群落中的最大相对密度为 1。

(5) 标准差标准化法^[25]:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (i=1,2,\cdots,n)$$

式中: S ——样本的标准差; X_i ——总体 X 的样本; n ——样本的个数。

试验数据采用 Excel 2003 和 SPSS 16.0 软件进行整理,Origin 8.0 作图;ANOVA 进行方差分析,多重比较利用 Least Significant Difference (LSD)法,文中小写字母相同代表差异不显著($p>0.05$),字母不同代表差异显著($p<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 黄河故道湿地土壤生物学性状特征

由表 1 可知,不同样地土壤有机质(SOM)含量差异极显著($F=42.430, p<0.01$),排列顺序为林地湿地(FW)>湿草地(HG)>沼泽湿地(MW)>盐碱滩地(SAW)。FW 的土壤有机质含量最高(7.87 g/kg),HG 和 MW 的 SOM 含量相近,无显著差异($p>0.05$);SAW 的 SOM 含量最低,为 2.40 g/kg,极显著低于 HG、MW 和 FW($p<0.01$),SOM 含量仅为 MW 和 FW 的 2.78%和 3.28%。土壤微生物碳(MBC)和土壤微生物氮(MBN)含量呈现出与 SOM 含量一致的规律,均为 FW>HG>MW>SAW,且差异显著($p<0.05$)。SOM 与 MBC 和 MBN 的相关系数分别为 0.998 和 0.999($p<0.01$),说明 SOM 含量与 MBC 和 MBN 含量关系极为密切。土壤基础呼吸(SR)在 0.11~0.24 mg/(g·d)之间变化,FW 的 SR 最高,其次为 HW 和 SAW, MW 的 SR 最低;SR 两两之间多重比较,均表现为显著差异($p<0.05$)。

表 1 黄河故道湿地土壤生物学指标

生物指标	SAW	HG	MW	FW
SOM/(g·kg ⁻¹)	2.40±0.21a	6.99±0.97b	6.68±0.70b	7.87±0.40b
MBC/(mg·kg ⁻¹)	30.55±8.59a	82.76±2.77b	81.35±1.91c	97.83±1.51b
MBN/(mg·kg ⁻¹)	6.41±0.88a	18.03±0.79bc	16.99±1.51b	19.40±0.63c
SR/(mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹)	0.16±0.03b	0.18±0.01bc	0.11±0.01a	0.24±0.02c
SUR/(mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹)	0.08±0.001a	0.13±0.02b	0.12±0.02ab	0.27±0.02c
SI/(mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹)	8.82±0.22a	9.82±0.19ab	9.35±0.50a	13.24±1.21c
SC/(ml·g ⁻¹ ·d ⁻¹)	1.00±0.07a	1.40±0.08a	1.12±0.05a	2.07±0.13b
SAP/(mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹)	0.68±0.07a	0.88±0.05b	0.84±0.13ab	1.17±0.12c

方差分析结果显示,各样地土壤脲酶(SUR)、蔗糖酶活性(SI)、过氧化氢酶活性(SC)和碱性磷酸酶活性(SAP)平均值差异显著($p<0.05$)。SUR、SI、AC 和 SAP 的活性变化规律一致,为 FW>HG>MW>SAW,各种酶活性均表现为 FW 最高,显著高于其它三种类型样地($p<0.05$)。多重比较表明,4 种酶活性除在 HG 和 MW 中无显著差异($p>0.05$),在其余样地中两两之间均表现出显著差异($p<0.05$)。

土壤动物群落组成和多样性见表 2,由表 2 可以看出,豫东黄河故道湿地共采集土壤动物 7 220 只,

隶属 5 门 8 纲 23 目 36 类群;土壤动物群落总个体数(TI)和总类群数(TN)在 FW 中最高,其次是 HG 和 MW,SAW 最低。土壤动物群落多样性分析表明,群落多样性指数 H' 、群落 DG 指数和均匀度指数 E 呈现较为一致的规律性,均为 MW 最高(3.50,9.13,1.47),多样性指数 H' 和群落 DG 指数显著高于 FW 的土壤动物群落多样性($p<0.05$),均匀度指数 E 之间差异性不显著($p>0.05$)。群落优势度指数 C 与多样性指数呈现相反的规律性,差异性不显著($p>0.05$)。

表 2 黄河故道湿地土壤动物群落多样性

样地类型	个体数(TI)	类群数(TN)	多样性指数(H')	群落 DG 指数	C	E
SAW	1108	17	3.13±0.11 ab	6.87±0.37 bc	0.25±0.05 a	1.24±0.08 a
HG	2308	23	3.01±0.08 ab	7.11±0.28 ab	0.35±0.06 a	0.99±0.05 a
MW	1386	22	3.50±0.02 a	9.13±0.26 a	0.15±0.14 a	1.47±0.13 a
FW	2418	24	2.78±0.13 b	4.19±0.31 c	0.40±0.10 a	0.81±0.02 a

2.2 土壤生物学性状的主成分分析

利用主成分分析(PCA)可减少变量的个数,用较少的因子来解释多种因素之间的关系,从而找出代表黄河故道湿地土壤质量特征的生物学指标。本文选择上述土壤生物学指标(SOM, MBC, MBN, SR, SUR, SI, SC, SAP)和土壤动物群落指标(TI, TN、多样性指数 H' 、群落 DG 指数、优势度 C 和均匀度 E)共 14 个指标为自变量(x_1-x_{14})进行主成分分析,首先对所测的土壤各指标进行标准化处理(见公式 5),然后进行主成分分析,结果见表 3。前两个主成分的特征值大于 1,方差贡献率分别为 63.857% 和 34.794%,累计方差贡献率高达 98.651%,具体见表 3 和下面的函数表达式:

$$P_1=0.326x_1+0.332x_2+0.321x_3+0.334x_4+0.323x_5+0.324x_6+0.318x_7+0.333x_8+0.056x_9+0.181x_{10}+0.215x_{11}+0.204x_{12}-0.068x_{13}+0.139x_{14}$$

$$P_2=0.102x_1-0.014x_2+0.114x_3+0.027x_4-0.092x_5-0.109x_6-0.130x_7-0.022x_8+0.447x_9+0.381x_{10}-0.347x_{11}-0.327x_{12}-0.443x_{13}+0.411x_{14}$$

表 3 土壤生物学指标主成分载荷矩阵

变量指标	主成分分析载荷		主成分得分系数	
	PRIN1	PRIN2	PRIN1	PRIN2
SOM	0.974	0.225	0.326	0.102
MBC	0.994	-0.030	0.332	-0.014
MBN	0.759	0.251	0.221	0.114
SR	0.998	0.058	0.334	0.027
SUR	0.967	-0.204	0.323	-0.092
SI	0.970	-0.241	0.324	-0.109
SC	0.950	-0.287	0.318	-0.130
SAP	-0.995	-0.048	0.333	-0.022
TI	0.167	0.985	0.056	0.447
TN	0.540	0.842	0.181	0.381
H'	0.642	-0.767	0.215	-0.347
DG	0.611	-0.722	0.204	-0.327
C	-0.204	-0.978	-0.068	-0.443
E	0.416	0.907	0.139	0.411
特征值	8.94	4.871		
方差贡献率/%	63.857	34.794		
累计方差贡献率/%	63.857	98.651		

通过各主成分的构成,可知 SOM、MBC、MBN、SR、SUR、SI、SC、SAP 在第 1 主成分上具有较高载荷,主要反映了土壤肥力和土壤酶活性;TI、TN、C、E 在第 2 主成分上具有较高的载荷,可以理解为第 2 主成分主要反映了土壤动物群落指标。第 1 主成分值越大,则土壤肥力水平、有机化合物、动植物残体的分解与转化效率越高;第 2 主成分值越大,则表明土壤动物群落多样性越高。

将各土壤生物学指标标准化后的数据分别带入上述两个主成分函数表达式中,得到 4 种样地土壤在两个主成分上的得分情况,见图 1。结果表明,在以 P_1 所代表的土壤质量水平上,各样地土壤质量水平依次为 $FW>HG>MW>SAW$;在以 P_2 所代表的土壤质量水平上,各样地土壤质量水平依次为 $MW>HG>FW>SAW$ 。土壤质量分异程度在 P_1 上稍高于在 P_2 上的分异程度,这可能与 P_1 对土壤质量水平的方差贡献率较大有关。

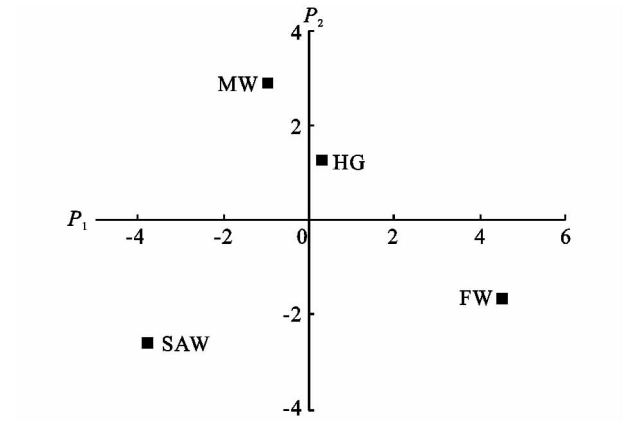


图 1 各样地土壤在主成分 1(P_1)和主成分 2(P_2)的得分分布

通过计算各样地在第一和第二主成分的得分 F_1 、 F_2 ,结合各主成分的方差贡献率,计算综合主成分得分: $\Sigma F=0.639F_1+0.348F_2$,结果见图 2。主成分得分高低可以反映土壤的生物学活性及对养分释放和利用的潜力,可以作为评价土壤质量生物学指标的依据。综合得分越高表明土壤的生物学活性越强,对土壤养分的积累、释放和转移等方面的潜力越大,土壤质量越好。由图 2 可以看出,FW 综合得分最高,为 2.304;其次为 HG 和 MW,综合得分分别为 0.631 和 0.394;SAW 土壤质量最低,为 -3.329。

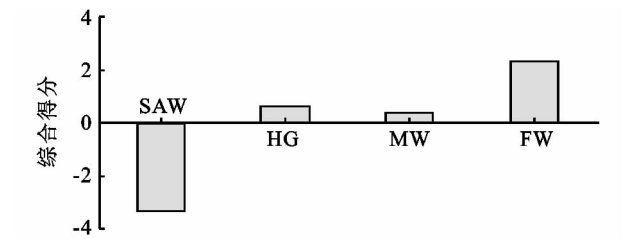


图 2 各样地土壤在主成分 1(P_1)和主成分 2(P_2)的综合得分

表 4 黄河故道湿地土壤质量生物学指标筛选归纳

综合因子	组成因子的变量	解释方差比例/%	最终选择指标
土壤微生物量和酶活性因子	SOM, MBC, SR, SUR, SI, SC, SAP	63.857	SOM, MBC, SR, SUR, SI, SC, SAP,
土壤动物群落指标因子	TI, TN, C, E	34.794	TI, TN, C, E

3 结论与讨论

(1) 通过对黄河故道湿地土壤生物学性质的分析,不同湿地类型土壤生物学特性差异显著($p < 0.05$)。林地湿地土壤有机质、土壤微生物生物量和土壤基础呼吸均较高,并与其它湿地类型差异显著。这可能与植被根系生物量、凋落物生物量有关,有机质含量的变化决定于地上有机物质的输入量大小^[13],林地和草地植物残体生物量较大,为土壤提供了较多的有机质。此外,林地湿地和湿草地人为干扰较小,良好的水热条件和通气状况为地上植被提供了优质的土壤环境,有机物质的输入量较大,使土壤有机质、微生物生物量及基础呼吸较高;同时也说明林地湿地土壤在生物量、土壤养分积累等方面较其它类型湿地土壤有一定的优势。盐碱滩地土壤有机质、土壤微生物生物量和土壤基础呼吸均为最低,这可能与其碱度过大及不良的土壤物理性状有关^[7,26]。盐碱滩地距离黄河故道较近,由于没有防治措施,地表植被稀疏,植被根系、凋落物等有机物稀少,不利于有机质及养分的累积,土壤生物学性状较差;说明土壤生物学指标在指示土壤质量受到环境胁迫时有一定的潜力。

(2) 土壤酶主要来自于土壤微生物、土壤动物和植物。土壤酶活性与土壤有机质的含量密切相关^[15],在土壤物质循环转化过程中起着重要作用;本文中土壤各种酶活性变化趋势均为林地湿地最高,湿草地和沼泽湿地其次,盐碱滩地最低。这主要是由于林地土壤表层有机物质多,有充分的营养物质供土壤动物和微生物的生长;同时,林地土壤表层通气状况和水热条件较其它样地好,土壤动物和微生物生长代谢旺盛,加之呼吸强度较高(表 1),使其土壤酶活性较高。湿草地和沼泽湿地土壤表层有机物质较少,土壤有机质含量较林地湿地低限制了土壤生物代谢产酶的能力。此外,积水改变了土壤动物和微生物群落,影响了土壤酶的释放^[27];在缺氧的条件下,需氧

2.3 评价指标选取

在统计分析的基础上,对土壤质量因子进行比较,依据敏感性、简洁性、代表性和独立性原则,经过归类,筛选得到 SOM、MBC、SR、SUR、SI、SC、SAP、TI、TN、C 和 E 共 11 个指标(表 4),用以表征和评价湿地土壤质量。

微生物和土壤动物对土壤有机质的分解速率降低,导致土壤酶活性不高^[16]。张文菊等^[28]研究表明,湿地有机碳降解和矿化速度与土壤含水量的高低密切相关,含水量高会抑制土壤有机碳的矿化,进而抑制土壤酶的分解作用。由于这些因素的作用,土壤酶活性在湿草地和沼泽湿地较林地低。本研究中,盐碱滩地受到高浓度的盐碱胁迫,致使其土壤酶活性最低。

(3) 土壤有机质、土壤微生物量、土壤酶活性、土壤动物群落多样性指标可以作为黄河故道湿地土壤质量的特征指标。土壤有机质含量的高低指示了土壤肥力状况;土壤微生物量的高低可以反映出土壤中微生物的数量,且微生物量指示了在土壤中周转速度较快的微生物活体中养分的含量^[29]。土壤酶活性可反映土壤有机质的矿化、降解和积累^[30],在一定程度上可以指示土壤肥力质量的高低。土壤动物是关系到土壤肥力提升的重要生物源^[31],以其复杂的功能群,通过对营养物质的转化、储存和释放等方式影响土壤有机碳动态平衡^[10],对土壤有机质的影响较大,被认为土壤生态系统变化的早期预警及敏感指标,指示土壤肥力的变化^[6,11]。上述这四类指标能够反映故道湿地土壤生物总量及活性,同时在一定程度上又可反映土壤养分及肥力状况,初步认为这四类指标可作为黄河故道湿地土壤生物学质量的特征指标。

(4) 主成分的综合得分反映土壤的生物活性及对养分利用的潜力,可以作为评价土壤质量的依据。通过计算,黄河故道湿地土壤质量高低依次为林地湿地、湿草地、沼泽湿地和盐碱滩地。林地湿地土壤质量综合得分最高,这与该地土壤有机质含量、土壤微生物量碳氮、土壤酶活性指标和土壤动物群落指标等的结果具有一致的规律性。由此可知,主成分这一统计分析结果可以反映土壤生物学特性的变异情况。

综上,黄河故道湿地土壤有机质含量、土壤微生物量碳氮含量、土壤基础呼吸、土壤酶活性和土壤动物群落多样性指标等差异显著,其变化规律为:林地

湿地>湿草地>沼泽湿地>盐碱滩地;说明不同湿地类型显著影响着土壤肥力和土壤生物学性状。土壤有机质、土壤微生物量、土壤酶活性和土壤动物群落多样性四类指标可作为黄河故道湿地土壤质量的特征指标,在一定程度上可反映土壤质量的变化情况,可以用来评价故道湿地土壤质量。

参考文献:

- [1] Niu Z, Zhang H, Gong P. More protection for China's wetlands[J]. *Nature*, 2011, 471(7338): 305.
- [2] 余定坤, 胡绍平, 杨清培, 等. 江西信丰森林健康示范区主要林分类型土壤水源涵养功能[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(3): 98-101.
- [3] Pan X, Wang B. Time for China to restore its natural wetlands[J]. *Nature*, 2009, 459(7245): 321-321.
- [4] Paolo A G, Raffaella B, Danio A, et al. Assessment of soil-quality index based on microarthropods in corn cultivation in Northern Italy[J]. *Ecological Indicators*, 2010, 10(2): 129-135.
- [5] Yan S K, Singh A N, Fu S L, et al. A soil fauna index for assessing soil quality[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 47(4): 158-165.
- [6] 朱新玉, 董志新, 况福虹, 等. 施肥方式对紫色土耕地土壤动物群落的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(2): 464-474.
- [7] 成毅, 安韶山, 马云飞. 宁南山区不同坡位土壤微生物生物量和酶活性的分布特征[J]. *水土保持研究*, 2010, 17(5): 148-153.
- [8] 刘占锋, 傅伯杰, 刘国华, 等. 土壤质量与土壤质量指标及其评价[J]. *生态学报*, 2013, 33(3): 901-913.
- [9] Sanderson K. Worm chewing changes soil chemistry[J]. *Nature*, 2007, doi:10.1038/news.070827-2.
- [10] Xin W D, Yin X Q, Song B. Contribution of soil fauna to litter decomposition in Songnen sandy lands in north-eastern China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2012, 77(2): 90-95.
- [11] Fu S L, Zou X M, Coleman D. Highlights and perspectives of soil biology and ecology research in China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(5): 868-876.
- [12] Bernard L, Chapuis-Laedy L, Razafimbelo T. Endogeic earthworms shape bacterial functional communities and affect organic matter mineralization in a tropical soil [J]. *The IMSE Journal*, 2012, 6(1): 222-231.
- [13] 刘云鹏, 申卫博, 张社奇, 等. 黄河中游湿地土壤养分与酶活性特征及相关性研究[J]. *草地学报*, 2013, 21(3): 474-484.
- [14] 李凤霞, 王学琴, 郭永忠, 等. 宁夏引黄灌区不同盐化程度土壤酶活性及微生物多样性研究[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(1): 61-65.
- [15] 万忠梅, 宋长春, 杨桂生, 等. 三江平原湿地土壤活性有机碳组分特征及其与土壤酶活性的关系[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(2): 406-412.
- [16] Omid H, Tahmasebi Z, Torabi H, et al. Soil enzymatic activities and available P and Zn as affected by tillage practices, canola (*Brassica napus* L.) cultivars and planting dates[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2008, 44(4): 443-450.
- [17] 张明, 张阳武, 朱文星, 等. 河南省郑州黄河自然保护区湿地恢复模式研究[J]. *湿地科学*, 2010, 8(1): 67-73.
- [18] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [19] 钟觉民. 幼虫分类学[M]. 北京: 农业出版社, 1990.
- [20] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [21] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 中国气象出版社, 2006.
- [22] 孙波, 车玉萍, 林心雄. 测定土壤有机质中¹²C及¹⁴C分解速率的密闭培养法[J]. *土壤*, 1997, 29(1): 51-53.
- [23] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1987.
- [24] 廖崇惠, 李健雄, 杨悦屏, 等. 海南尖峰岭热带林土壤动物群落: 群落的组成及其特征[J]. *生态学报*, 2002, 22(11): 1866-1872.
- [25] 鲍艳, 胡振琪, 柏玉, 等. 主成分聚类分析在土地利用生态安全评价中的应用[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(8): 87-90.
- [26] Li M, Zhang J, Wang G, et al. Organic phosphorus fractionation in wetland soil profiles by chemical extraction and phosphorus-31 nuclear magnetic resonance spectroscopy[J]. *Applied Geochemistry*, 2013, 33(7): 213-221.
- [27] Kang H, Freeman C. Phosphatase and arylsulphatase activities in wetland soils: annual variation and controlling factors[J]. *Soil Biological and Biochemistry*, 1999, 31(3): 449-454.
- [28] 张文菊, 童成立, 杨钙仁, 等. 水分对湿地沉积物有机碳矿化的影响[J]. *生态学报*, 2005, 25(2): 249-253.
- [29] Foulquier A, Volat B, Neyra M, et al. Long-term impact of hydrological regime on structure and functions of microbial communities in riverine wetland sediments[J]. *Fems Microbiology Ecology*, 2013, 85(2): 211-226.
- [30] 高海峰, 白军红, 王庆改, 等. 霍林河下游典型洪泛区湿地土壤 pH 值和土壤含水量分布特征[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(1): 268-271.
- [31] Powers J S, Corre, M D, Twine T E, et al. Geographic bias of field observations of soil carbon stocks with tropical land-use changes precludes spatial extrapolation[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 2011, 108(15): 6318-6322.