



汾河流域中下游植物群落物种 多样性与土壤因子的关系

王慧敏¹, 张 峰², 庞春花^{1*}, 赵彩莉¹, 范 晓¹

(1 山西师范大学 生命科学学院, 山西临汾 041004; 2 山西大学 生命科学学院, 太原 030006)

摘 要: 于 2011 年 4~10 月对汾河流域中下游 33 个样地 128 个样方的植被进行样地调查和土壤取样分析, 并运用双向指示种分析(TWINSPAN)进行群落分类, 用典范对应分析法(CCA)分析 7 种土壤因子与汾河流域中下游植物群落的分布关系, 以揭示汾河流域中下游植被的物种多样性与土壤因子的关系。结果表明: (1) 汾河流域中下游地区共发现植物 121 种, 隶属 33 科 81 个属, 其中以菊科、禾本科、藜科和蓼科植物最多, 分别占总数的 24.79%、14.05%、8.26% 和 7.43%, 且芦苇的分布频率最高, 达到 49%。(2) 双向指示种分析表明, 汾河流域中下游 33 个样地分为 8 个群落类型(I~Ⅷ)。(3) 汾河流域中下游植物群落的 Patrick 丰富度指数和 Shannon-Wiener 指数变化趋势相似, 而 Simpson 指数则与 Patrick 丰富度指数和 Shannon-Wiener 指数呈相反的变化趋势; Pielou 均匀度指数的变化趋势与其他 3 个指数均不同。(4) 汾河流域中下游土壤含水量、速效钾含量在不同群落类型的不同样地间的差异大部分达到显著水平, 土壤养分具有比较明显的空间分布中度不均的特点。(5) 汾河流域中下游地区的土壤有机质含量与物种 Simpson 指数以及土壤全氮与 Pielou 均匀度指数均具有显著负相关关系。(6) CCA 排序结果表明, 土壤含水量及速效磷、速效钾含量是影响植被群落分布最重要的环境因子。

关键词: 汾河流域; 植物群落; 土壤因子; 物种多样性; 双向指示种分析; 典范对应分析

中图分类号: Q948.113

文献标志码: A

Interrelation between Plant Species Diversity and Soil Factors in the Middle and Lower Reaches of Fenhe River

WANG Huimin¹, ZHANG Feng², PANG Chunhua^{1*}, ZHAO Caili¹, FAN Xiao¹

(1 College of Life Sciences, Shanxi Normal University, Linfen, Shanxi 041004, China; 2 School of Life Science, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: From May to October 2011, sample-plot survey and soil sampling analysis have been carried out in 128 quadrats of vegetation in 33 sample areas in the middle and lower reaches of the Fenhe River. TWINSPAN was applied to classify the phytocoenosium, and canonical correspondence analysis (CCA) was used to analyze the distribution relation between soil factor and phytocoenosium, in order to reveal the relationship between species diversity and soil factor of phytocoenosium in the middle and lower reaches of the Fenhe River. The results shows that: (1) In the middle and lower reaches of the Fenhe River, 121 kinds of plants have been discovered which belong to 33 families and 81 genera, of which Compositae, Gramineae, Chenopodiaceae and Polygonaceae plants are the most, accounting for 24.79%, 14.05%, 8.26% and 7.43% of the

收稿日期: 2013-05-07; 修改稿收到日期: 2013-09-29

基金项目: 山西省软科学研究项目(2012041015-01); 山西省留学基金项目(20100012); 山西师范大学自然科学基金项目(SMYKZ-9); 大学生创新实验项目(SD2012CXSXY-32)

作者简介: 王慧敏(1983—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事植物生态学方面的研究。E-mail: 15934559260@126.com

* 通信作者: 庞春花, 副教授, 主要从事植物生态学方面的研究。E-mail: pangch6269@126.com

total number, respectively. The distribution frequency of *Phragmites australis* is the highest which reaches to 49%. (2) TWINSpan indicates that 33 sample areas in the middle and lower reaches of the Fenhe River are divided into 8 coenotypes (I ~ VIII). (3) Patrick richness index and Shannon-Wiener index variation tendency of phytocoenosis in the middle and lower reaches of the Fenhe River are similar, while Simpson index shows a contrary tendency with the change pattern of Patrick richness index and Shannon-Wiener index; the variation tendency of Pielou evenness index is different from other three indexes. (4) Most of the content differences of soil water content and rapidly available potassium content in the middle and lower reaches of the Fenhe River reach significant level among different sample areas of different coenotypes. The soil nutrients are characterized by apparent moderate nonuniform spatial distribution. (5) The content of soil organic matter and species Simpson index, soil total nitrogen and Pielou evenness index have significant negative correlation in the middle and lower reaches of the Fenhe River basin. (6) The result of CCA ranking demonstrates that soil water content, rapidly available phosphorus and rapidly available potassium content are the most important environmental factors which influence vegetation type distribution.

Key words: Fenhe River; plant community; soil factor; species diversity; Two-way indicator species analysis (TWINSpan); canonical correspondence analysis (CCA)

物种多样性是最简单有效的描述群落多样性的方法^[1-2]。对物种多样性进行深入探讨,不仅可以反映群落或生境中物种的丰富度、变化程度或均匀度,也可反映不同自然地理条件与群落的相互关系^[3-4]。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,一直是生态学研究的热点^[5]。研究植物群落物种多样性随土壤因子的变化特征是揭示生物多样性与土壤因子相互关系的重要方面。杨玉海等^[6]研究了塔里木河下游土壤特性对物种多样性的影响,表明土壤有机质、全氮、全磷、全钾等对物种多样性变化有一定影响。王顺忠等^[7]利用逐步回归的方法对青海湖鸟岛地区植物群落物种多样性与土壤环境因子的关系研究表明,不同地区土壤因子对植物群落物种多样性的影响具有一定的差异性。目前,许多学者就汾河流域湿地数量分类与排序^[8]、湿地退化特征及恢复对策^[9]、物种多样性^[10]、植被类型及其利用与保护^[11]、种间关联^[12]等方面做了大量工作,但对汾河流域中下游植被与土壤因子的关系研究未见报道。

为了定量研究汾河流域中下游植被的物种多样性与土壤因子之间的关系,本研究以汾河流域中下游植被为研究对象,采用相关与回归、双向指示种分析(TWINSpan)和典范对应分析(CCA)等探讨汾河流域中下游植被物种多样性、植被分布与土壤因子的关系,以期对汾河流域的植被恢复与重建,生物多样性维持与生态系统管理提供一定的参考价值和理论指导。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

汾河是山西最大河流,是注入黄河的第二大支流。发源于宁武县管涔山,流经忻州、太原、晋中、吕梁、临汾和运城等 34 个县(市),沿途汇入岚河、潇河、文峪河、昌源河、洪安涧河、涝河、巨河、浍河等支流,于河津东湖潮村注入黄河,全长 694 km,流域面积 39 471 km²,占全省湿地面积的 1/6。汾河上游为源头至太原上兰村,中游为太原上兰村至洪洞石滩,石滩至河津为下游。汾河流域地处山西省的中部和西南部,位于东经 110°30'~113°32',北纬 35°20'~39°00',呈带状分布,属温带大陆性气候,为半干旱、半湿润型气候过渡区,四季变化明显,年平均气温 6.2℃~12.8℃,1 月平均气温 -9.7℃~-2.6℃,7 月平均气温 20.0℃~26.8℃,≥10℃积温 2 541.2℃~4 271.3℃。全年 70% 的降雨量集中在 6~9 月份,全流域多年平均降雨 504.8 mm^[10]。

汾河河岸植物群落的分布受地貌类型和河岸水分条件的影响较大,沙棘(*Hippophae rhamnoides*)群落、小香蒲(*Typha minima*)群落主要分布在上游山地河谷河岸,怪柳(*Tamarix chinensis*)群落、假苇拂子茅(*Calamagrostis pseudophragmites*)群落等多见于中游河漫滩和淤积河岸。蒿属(*Artemisia*)群落、芦苇(*Phragmites australis*)群落、赖草(*Aneluroidium desystachys*)群落等主要出现在一、二级阶地上。沼泽化草甸类型分布在河流的高河漫滩,沼泽类型则广泛分布在河流的低河漫滩和阶地低洼地。从纵向看各类群落在河流两侧呈对列式不

规则分布。从河流中心到两岸,由于水分的梯度变化,植物群落从河流中的水生植物群落、沼泽、沼泽化草甸到河岸边缘的中生植物群落^[11]。

1.2 样方设置与调查

2011 年 4 月~2011 年 10 月,对汾河流域中下游(霍州、洪洞、临汾、襄汾段)植被进行调查。采用典型取样方法,在汾河两岸沿河岸线分别设置 1 条 5 m 宽的水平样带,在每条水平样带上每间隔 500 m 设置 1 个样地(每个样地设置 3~5 个 1 m×1 m 的草本样方),共取样地 33 个。调查记录每个样地的海拔、经纬度以及样地里每个样方的总盖度、植物种名、盖度、平均高度,同时在样地内采用五点法取 0~20 cm 土样,混合均匀后带回实验室分析。土壤有机质(SOM)测定采用重铬酸钾—外加加热法;全氮(TN)采用凯氏蒸馏定氮法;速钾(AK)采用醋酸铵提取火焰光度法;速磷(AP)采用氢氧化钠熔融钼锑抗比色法;pH 值采用 pH 仪测定;电导率(EC)采用电导率仪测定;土壤含水量(SW)用容量法测定^[13]。

1.3 数据处理

(1)用重要值作为综合指标处理数据^[14-15]。草本重要值采用下式计算:

草本重要值=相对盖度+相对高度

(2)物种多样性指数^[16]:

(a)Patrick 丰富度指数: $R=S$ (1)

(b)Simpson 指数:

$$\lambda = \sum_{i=1}^S N_i(N_i - 1) / [N(N - 1)]$$
 (2)

(3)Shannon-Wiener 指数:

$$H = - \sum_{i=1}^S \frac{N_i}{N} \ln(\frac{N_i}{N})$$
 (3)

(4)Pielou 均匀度指数: $E = H / \ln S$ (4)

式中,S 为每一个样方中的物种总数,N 为 S 个种的全部重要值之和, N_i 为第 i 个种的重要值,用以上各式及 S 度量各个样地的多样性^[17]。

用 TWINSpan 对样地进行分类,分成不同的群落类型;用 Excel 进行多样性指数的计算和绘图;用 SPSS 软件分析各群落物种多样性指数与土壤因子的相关与回归,土壤养分的描述性分析;用 Canoco4.5 对群落分布与土壤因子进行排序,用 CanoDraw 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 汾河流域中下游植物群落的结构类型

2.1.1 植被调查结果 对汾河流域中下游植被 33 个样地 128 个样方的调查,共发现植物 121 种,隶属

33 科 81 个属,其中以菊科、禾本科、藜科和蓼科植物最多,分别占总数的 24.79%、14.05%、8.26%和 7.43%。其中,芦苇(*Phragmites australis*)的分布频率最高,其次为扁秆藨草(*Scirpus planiculmis*)和皱叶酸模(*Rumex crispus*)。重要值>1 的物种共有 34 个,见表 1。

2.1.2 植物群落的结构类型及其组成 采用双向指示种划分法(TWINSpan)对汾河流域中下游植物群落 33 个样地进行等级分类。采用第三级水平的划分结果(图 1),依据中国植被的分类原则和系统,结合调查结果的生态分析和群落生境特征的指

表 1 34 种植物的编号及重要值

Table 1 Name, number and importance value of 34 species

编号 No.	物种 Species name	重要值 Importance value	频率 Frequency /%
1	芦苇 <i>Phragmites australis</i>	11.64	49
2	扁秆藨草 <i>Scirpus planiculmis</i>	5.48	27
3	皱叶酸模 <i>Rumex crispus</i>	3.43	22
4	狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	3.43	20
5	黄花蒿 <i>Artemisia annua</i>	2.93	19
6	飞蓬 <i>Erigeron acer</i>	2.47	20
7	猪毛菜 <i>Salsola collina</i>	2.43	16
8	葎草 <i>Humulus scandens</i>	2.32	20
9	水葱 <i>Scirpus validus</i>	2.10	9
10	无芒稗 <i>Echinochloa crusgali</i> var. <i>mitis</i>	2.09	16
11	藜 <i>Chenopodium album</i>	1.93	17
12	香蒲 <i>Typha orientalis</i>	1.86	5
13	酸模叶蓼 <i>Polygonum lapathifolium</i>	1.82	13
14	苣荬菜 <i>Sonchus arvensis</i>	1.77	7
15	野薄荷 <i>Mentha haplocalyx</i>	1.77	9
16	腋花苋 <i>Amaranthus roxburghianus</i>	1.73	12
17	牛皮消 <i>Cynanchum auriculatum</i>	1.44	12
18	纤毛鹅观草 <i>Roegneria ciliaris</i>	1.44	11
19	益母草 <i>Leonurus artemisia</i>	1.38	6
20	苍耳 <i>Xanthium sibiricum</i>	1.32	13
21	稗 <i>Echinochloa crusgali</i>	1.25	8
22	藺葜 <i>Eclipta prostrata</i>	1.24	9
23	野胡萝卜 <i>Daucus carota</i>	1.19	12
24	毛莲蒿 <i>Artemisia vestita</i>	1.18	8
25	广布野豌豆 <i>Vicia cracca</i>	1.18	5
26	水蓼 <i>Polygonum hydropiper</i>	1.17	8
27	杖藜 <i>Chenopodium giganteum</i>	1.13	9
28	风花菜 <i>Rorippa globosa</i>	1.12	9
29	灰绿藜 <i>Chenopodium glaucum</i>	1.07	10
30	朝天委陵菜 <i>Potentilla supina</i>	1.07	14
31	水柳 <i>Homonoia riparia</i>	1.03	8
32	水棘针 <i>Amethystea caerulea</i>	1.03	5
33	曼陀罗 <i>Datura stramonium</i>	1.02	4
34	野豌豆 <i>Vicia sepium</i>	1.02	5

示种和优势种命名群落类型,得到了根据不同优势种确定的 8 种群落类型(图 1)。每种群落类型的优势种及主要环境特征见表 2。

群落 I :猪毛菜+野薄荷群落(Com. *Salsola collina*+*Mentha haplocalyx*)以猪毛菜和野薄荷(重要值分别为 24. 18 和 19. 39)为优势种,主要的伴生种有苣荬菜(*Sonchus arvensis*)和野豌豆(*Vicia sepium*)。

群落 II :草木犀+铁杆蒿群落(Com. *Melilotus officinalis*+*Artemisia vestita*)以草木犀和铁杆蒿为优势种,常常伴生物种有反枝苋(*Amaranthus retroflexus*)、朝天委陵菜(*Potentilla supina*)和无芒稗(*Echinochloa crusgali* var. *mitis*)等等,物种丰富。

群落 III :芦苇+扁秆藨草群落(Com. *Phragmites australis* + *Scirpus planiculmis*)以芦苇(45. 58)和扁秆藨草(36. 41)为优势种,常伴生有皱叶酸模(*Rumex crispus*)、醴肠、宽叶香蒲(*Typha latifolia*)、水鳖(*Hydrocharis dubia*)。

群落 IV :芦苇+酸模叶蓼群落(Com. *Phragmites australis* + *Polygonum lapathifolium*)以芦苇和酸模叶蓼(重要值分别为 19. 36 和 18. 01)为优势种,常伴生有扁秆藨草、朝天委陵菜、皱叶酸模。

群落 V :芦苇+白茅群落(Com. *Phragmites australis*+*Imperata cylindrica*)以芦苇和白茅为优势种,常伴生地肤(*Kochia scoparia*)、土荆芥(*Chenopodium ambrosioides*)、香蒲(*Typha orientalis*)。

群落 VI :芦苇+荻群落(Com. *Phragmites australis*+*Triarrhena sacchariflora*)以芦苇和荻为优势种,常伴生有灰绿藜(*Chenopodium glaucum*)、皱叶酸模、风花菜。

群落 VII :芦苇+水葱群落(Com. *Phragmites*

australis+*Scirpus validus*)以芦苇和水葱为优势种,常伴生有扁秆藨草、红蓼(*Polygonum orientale*)、女菀(*Turczaninowia fastigiata*)、石龙芮(*Ranunculus sceleratus*)。

群落 VIII :飞廉+铺地黍群落(Com. *Carduus nutans*+*Panicum repens*)以飞廉和铺地黍为优势种,常伴生有风花菜(*Rorippa globosa*)、黄花蒿(*Artemisia annua*)、箭叶旋花(*Convolvulus arvensis*)。

2.2 汾河流域中下游植物群落物种多样性与土壤因子的关系

2.2.1 植物群落物种多样性 由图 2 可以看出,Patrick 丰富度指数与 Shannon-Wiener 指数变化趋势近乎相同,群落 I 的物种多样性指数最高,该群落包括的样地 32、33 分布于襄汾段的汾河,人为干扰

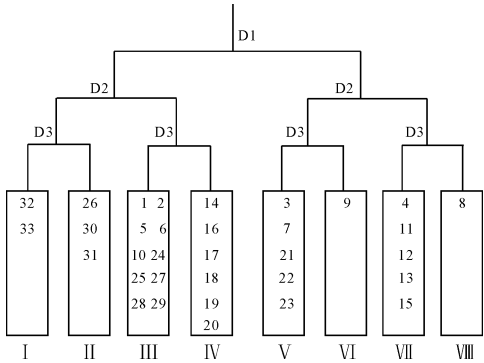


图 1 汾河流域中下游植物群落 33 个样地的 TWINSpan 分类树状图

D 表示分级水平; I ~ VIII 表示群落类型编号; 1~33 分别代表 33 个样地。下同

Fig. 1 Dendrogram of the TWINSpan classification of 33 sample plots in Fenhe River of the middle and lower reaches
D indicates the level of division; I ~ VIII. Community types number; 1~33. The 33 sample area. The same as below

表 2 汾河流域中下游的植物群落类型及环境特征

Table 2 The plant community types and environmental characteristics in the middle and lower reaches of Fenhe River

群落类型 Community type	群落名称 Community name	海拔高度 Altitude /m	盖度 Coverage /%	样地编号 Sample	样地类型 Sample type
I	猪毛菜+野薄荷 Com. <i>Salsola collina</i> + <i>Mentha haplocalyx</i>	420~440	35~40	32、33	河漫滩 Washland
II	草木犀+铁杆蒿 Com. <i>Melilotus officinalis</i> + <i>Artemisia vestita</i>	420~440	30~45	26、30、31	河漫滩 Washland
III	芦苇+扁秆藨草 Com. <i>Phragmites australis</i> + <i>Scirpus planiculmis</i>	455~470	70~85	1、2、5、6、10、24、25、27、28、29	湿地 Wetland
IV	芦苇+酸模叶蓼 Com. <i>Phragmites australis</i> + <i>Polygonum lapathifolium</i>	455~470	50~60	14、16、17、18、19、20	湿地 Wetland
V	芦苇+白茅 Com. <i>Phragmites australis</i> + <i>Imperata cylindrica</i>	455~470	45~55	3、7、21、22、23	湿地 Wetland
VI	芦苇+荻 Com. <i>Phragmites australis</i> + <i>Triarrhena sacchariflora</i>	455~470	30~45	9	湿地 Wetland
VII	芦苇+水葱 Com. <i>Phragmites australis</i> + <i>Scirpus validus</i>	455~470	60~75	4、11、12、13、15	湿地 Wetland
VIII	飞廉+铺地黍 Com. <i>Carduus nutans</i> + <i>Panicum repens</i>	440~490	35~40	8	河漫滩 Washland

少,群落结构复杂,植被的生态型较多,尤其是旱生和中生植物物种较多,生态适应型分布也多,物种相对丰富,所以物种多样性指数高。群落Ⅵ的物种多样性指数最低,由于该群落包括的样地 9 分布于霍州段的汾河,污水排放和人为的开垦种植对植被产生了一定的影响,物种种类少,而且芦苇和荻的优势地位比较明显,所以多样性指数最低。Simpson 优势度指数的变化趋势与 Patrick 丰富度指数和 Shannon-Wiener 指数的相反。它所反映的是优势种在群落中的地位和作用的大小^[18]。如果某个或某几个优势种在群落中占有突出地位,那么,Simpson 优势度指数值就较高^[19]。Pielou 均匀度指数的变化趋势和上面 3 个指数都不同。均匀度指数表征着群落中不同物种多度分布的均匀程度,分布越均匀,指数越大。均匀度指数在一定程度上与物种种类无关,只反映不同物种之间的数量对比关系^[20],所以均匀度指数的变化趋势和其他指数不同。

2.2.2 植物群落的土壤特征 8 个群落土壤指标有所差异,土壤 pH 值介于 7.28~8.74 之间,均为碱性;土壤含水量均值为 25.16%;电导率为 0.42;速效磷含量为 1.38 mg/kg;速效钾、有机质、全氮的平均含量分别为 0.18、9.99、0.36 g/kg(表 4)。在土壤理化性质的 7 个指标中,土壤含水量、速效钾含量在不同群落类型的不同样地间差异大部分达到显著水平(表 3),其余 5 种土壤理化性质在不同样地间并未达到显著程度,表明汾河流域中下游土壤养分含量变化趋势不明显。

根据变异系数(CV)的大小可以粗略估计变量的变异程度,CV≤0.1 属于弱变异性,0.1≤CV≤1 属于中等变异性,CV≥1 属于强变异性。从表 4 可

知,电导率(EC)、速效钾(AK)、速效磷(AP)、土壤有机质(SOM)、全氮(TN)、土壤含水量(SW)的变异系数在 0.154~0.517 之间,都属于中等变异程度,存在异质性现象;而土壤 pH 值属于弱变异程度。结果反映了汾河流域中下游土壤养分具有空间分布中度不均的特点。

2.3 汾河流域中下游物种多样性指数与土壤因子的相关分析

8 个群落的 7 个土壤因子相关分析结果(表 5)显示,群落物种多样性与土壤因子的相关性主要表现在与土壤有机质(SOM)含量、全氮(TN)含量的相关性。其中,样地中土壤有机质(SOM)的含量与 Simpson 指数(λ)具有显著负相关关系($P<0.05$),

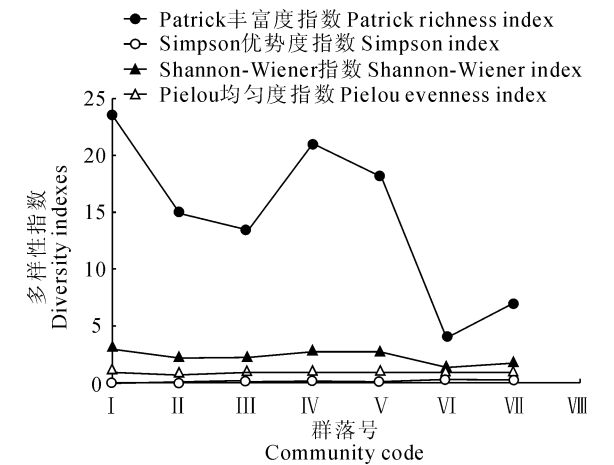


图 2 汾河流域中下游 8 个群落的物种多样性指数的变化曲线
Fig. 2 The curve graph of species diversity indices of 8 community in the middle and lower reaches of Fenhe River

表 3 汾河流域中下游 8 个植物群落类型的土壤环境特征

Table 3 Soil environment characteristics of 8 community in the middle and lower reaches of Fenhe River

群落号 Community code	速效 K Available potassium /(g/kg)	电导率 Electric conductivity	pH 值 pH value	速效 P Available phosphorus /(mg/kg)	有机质 Organic matter /(g/kg)	全 N Total nitrogen /(g/kg)	土壤含水量 Soil moisture content/%
I	0.14bc	0.14b	8.74a	1.50a	10.75a	0.33a	19.19cd
II	0.23ab	0.75a	7.28b	1.32a	14.24a	0.36a	15.19d
III	0.16abc	0.48ab	8.33a	1.18a	12.47a	0.42a	35.64ab
IV	0.14bc	0.57ab	8.24a	1.46a	10.07a	0.34a	24.23c
V	0.28a	0.26ab	8.43a	1.73a	8.75a	0.36a	31.42b
VI	0.09c	0.57ab	8.23a	0.62a	5.54a	0.43a	22.91c
VII	0.22ab	0.33ab	8.30a	1.71a	9.99a	0.40a	40.59a
VIII	0.18abc	0.17b	8.49a	1.38a	7.35a	0.25a	12.12d

注:同一列中不含有相同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。
Note: The different normal letters in same column mean significant difference among communities($P<0.05$).

表 4 汾河流域中下游土壤养分的统计分析

Table 4 Descriptive statistics of soil nutrients in the middle and lower reaches of Fenhe River

项目 Item	平均值 Mean	最大值 Maximum	最小值 Minimum	标准差 Standard deviation	偏度 Skew	峰度 Kurtosis	变异系数 Coefficient variation
pH	8.248	8.740	7.279	0.425	-1.931	5.071	0.051
电导率 EC	0.424	0.755	0.139	0.219	0.113	-1.228	0.517
速效钾 AK	0.179	0.261	0.099	0.055	0.146	-1.144	0.307
速效磷 AP	1.384	1.709	0.859	0.274	-0.873	0.897	0.198
有机质 SOM	9.986	14.238	6.270	2.596	0.230	-0.316	0.260
全氮 TN	0.356	0.418	0.249	0.055	-0.911	1.014	0.154
土壤含水量 SW	25.162	40.592	12.122	9.986	0.313	-1.095	0.397

表 5 汾河流域中下游物种多样性指数与土壤理化性质指标的 Pearson 相关系数

Table 5 Pearson correlation coefficients between species diversity and soil chemical indices in the middle and lower reaches of Fenhe River

多样性指数 Diversity index	速效钾 AK	pH	速效磷 AP	有机质 SOM	全氮 TN	土壤含水量 SW	电导率 EC
<i>R</i>	-0.118	0.325	0.336	0.586	-1.00	-0.241	0.228
λ	-0.180	-0.162	-0.324	-0.745 *	-0.073	0.319	-0.269
<i>H</i>	-0.110	0.387	0.383	0.507	-0.282	-0.0206	-0.088
<i>E</i>	-0.516	0.451	0.159	-0.561	-0.847 *	0.259	-0.487

注:*R*. Patrick 丰富度指数; λ . Simpson 指数;*H*. Shannon-Wiener 指数;*E*. Pielou 均匀度指数;*, $P<0.05$ 。下同。

Notes:*R*. Patrick richness index; λ . Simpson index;*H*. Shannon-Wiener index;*E*. Pielou evenness index;*, $P<0.05$. The same as below.

土壤全氮(TN)与 Pielou 均匀度指数(*E*)具有显著负相关关系($P<0.05$),相关系数分别为-0.745 和-0.847。而 Patrick 丰富度指数(*R*)和 Shannon-Wiener 指数(*H*)与土壤因子的相关性不显著。

从 Pearson 相关系数分析(表 5)可知,样地中物种多样性指数与土壤因子的关系各不相同,对汾河流域中下游植物群落物种多样性与土壤因子的逐步回归统计结果如表 6 所示,Simpson 指数(λ)中只有单因子有机质(SOM)的含量进入回归模型,复相关系数为 0.745,模型的 *F* 检验为显著相关($P<0.05$)。Pielou 均匀度指数(*E*)中只有单因子全氮(TN)进入回归模型,并且复相关系数为 0.847,模型的 *F* 检验为极显著($P<0.01$)相关。另外两个多样性指数(*R* 和 *H*)都没有因子进入回归模型。回归模型分析与 Pearson 相关系数分析结果一致,由此可见,群落各个物种多样性指数受土壤因子的影响不完全相同。

2.4 植物群落分布与土壤因子的关系

以 7 个土壤因子建立环境数据矩阵,以物种重要值建立物种数据矩阵,对汾河流域中下游植物群落类型进行 CCA 排序,排序结果见表 7、表 8 和图 3。由表 7 可知,CCA 排序中前两个排序轴的特征值分别为 0.353、0.222;植物种类组成和土壤因子

表 6 汾河流域中下游群落物种多样性与土壤因子的逐步回归分析

Table 6 Stepwise multiple regression between species diversity indices and soil factor in the middle and lower reaches of Fenhe River

多样性指数 Diversity index	逐步回归模型 Stepwise regress model	复相关系数 Multiple correlation	综合 <i>F</i> 值 Integration <i>F</i>
λ	$\lambda=0.382-0.025 \text{ SOM}$	0.745	7.498
<i>E</i>	$E=1.136-0.679 \text{ TN}$	0.847	15.205

与前两个排序轴的相关系数分别为 0.926、0.760。前两轴的物种与土壤因子相关系数较高,共解释了物种-环境关系总方差的 48.7%,因此排序结果能基本反映汾河流域中下游植物群落空间分布的特征。

前两轴物种与土壤因子相关系数较高,共解释了物种-环境关系总方差的 48.7%,根据前两个排序轴做出二维排序图(图 3)。在排序图中,箭头所处的象限表示环境因子与排序轴之间的正负相关性,箭头连线的长度表示环境因子与群落分布相关程度的大小,箭头连线与排序轴的夹角代表这个环境因子与排序轴的相关性大小,夹角越小,相关性越好。由 CCA 排序图(图 3)和表 8 得出,CCA 第一排序轴与土壤含水量(SW)为极显著负相关($P<$

表 7 汾河流域中下游 CCA 排序的特征根

Table 7 The eigenvalues of CCA in the middle and lower reaches of Fenhe River

项目 Item	轴 Axis			
	1	2	3	4
特征值 Eigenvalues	0.353	0.222	0.206	0.137
物种-环境相关性 Species-environment correlations	0.926	0.760	0.799	0.746
累计百分比方差 Cumulative percentage variance				
物种数据 Species data	7.2	11.7	16.0	18.8
物种-环境关系 Species-environment relation	29.9	48.7	66.2	77.8
总特征值 Sum of all eigenvalues		4.890		
总典范特征值 Sum of all canonical eigenvalues		1.180		

表 8 汾河流域中下游植物群落土壤因子
与 CCA 排序轴的相关系数

Table 8 Correlation coefficients between environmental factors and CCA ordination axes in the middle and lower reaches of Fenhe River

项目 Item	轴 1 Axis 1	轴 2 Axis 2	轴 3 Axis 3
pH	0.285 4	-0.057 7	0.031 7
DT	0.197 3	-0.302 0	0.156 7
AK	-0.301 4	0.627 0**	-0.113 2
AP	0.002 7	0.340 8*	-0.125 5
SOM	-0.136 4	-0.181 7	-0.124 3
TN	0.175 2	-0.012 1	0.632 1**
SW	-0.909 1**	-0.042 7	0.008 8

Nose: *, $P<0.05$; **, $P<0.01$.

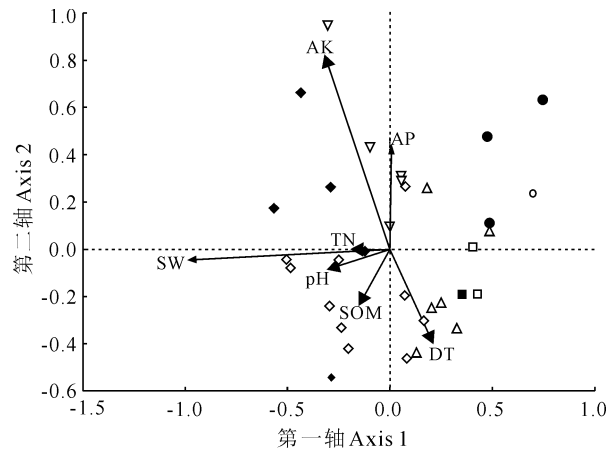


图 3 汾河流域中下游植物群落类型与
土壤因子的 CCA 排序图

图中群落类型标示方法:□. 群落 I;●. 群落 II;◇. 群落 III;
△. 群落 IV;▽. 群落 V;■. 群落 VI;◆. 群落 VII;○. 群落 VIII

Fig. 3 CCA of plant community and soil factors in the
middle and lower reaches of Fenhe River

Figure in the community types labeled method;
□. Community I;●. Community II;◇. Community III;
△. Community IV;▽. Community V;■. Community VI;
◆. Community VII;○. Community VIII

0.01),土壤含水量(SW)从左到右逐渐降低;CCA第二排序轴与速钾(AK)为极显著正相关($P<0.01$),与速磷(AP)为显著正相关($P<0.05$),速磷(AP)和速钾(AK)沿着第二排序轴从下到上逐渐增大。其他因子与排序轴相关性不强。这表明影响汾河流域中下游植物群落分布的主要土壤因子是土壤含水量(SW)、速钾(AK)和速磷(AP)。将 TWINS-PAN 分成的 8 个群落类型标示在 CCA 排序图中,沿第一轴方向 8 个群落很好地分散开来,从左到右分别为群落 V、群落 IV、群落 VI、群落 I、群落 II、群落 VIII。剩下的两个群落沿着第二轴更好地分散开来,由上到下分别为群落 VII 和群落 III,群落 III 与群落 IV、群落 V 有不同程度的重叠。

3 讨 论

3.1 物种多样性及其与土壤因子的关系

在本研究的野外调查中共出现了 121 个物种,以多年生草本为主,菊科、禾本科和藜科为物种种数最多的 3 个科,证明了其作为世界广布科对环境的高度适应性。在样地中,芦苇、扁秆藨草、皱叶酸模出现频率最高,分别达到 49%,27%,22%。芦苇是湿生植物,分布区域广泛,根系较深,毛细根大多分布在表层土壤中^[21],它的生长与水分丰富程度关系很大,在水分充足的时段或地段,长势明显要好。扁秆藨草、皱叶酸模为汾河流域中下游的常见种,常与芦苇伴生存在,耐盐碱。物种的分布体现了汾河流域湿地植被的物种组成特点。

由于研究区的海拔变化范围不是很大,样地的气候环境相似,所以由海拔变化所引起的热量、水分等气候因素对于多样性的影响不是很大。本文主要分析了土壤因素所引起的多样性指数的变化。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^[5],植物群落的物种多样性随着土壤肥沃程度的增加而增加,有研究证实了在小尺度内土壤养分和植物多样性呈负相关^[22]。本研究结果表明汾河流域中下游植物群落多样性随土壤有机质、全氮含量的减少而增加,呈负相关关系,这与肖德荣对滇西北高原纳帕海湿地的研究结果相同^[5]。

本研究中,群落Ⅵ所处样地由于靠近河岸带,植物群落常年淹水,土壤全量养分处于相对封闭状态,尽管土壤有机质(SOM)、全氮(TN)含量很高,但不利于植物的吸收利用,仅适于少数水生或湿生植物的生长,形成以芦苇为优势种的单优群落,致使群落多样性降低;群落Ⅰ所处样地位于汾河流域中下游水分环境随季节性丧失的河岸带,湿地淹水环境不断丧失,土壤通气性增加,使表层土壤处于较为干燥环境而有利于有机质矿化,同时,不同植物之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^[23],限制了水生和湿生优势物种发展,使得更多物种共存、物种多样性增加^[24]。

由于近年来对汾河流域水资源的无序利用,使得湿地植被发生一定的改变,土壤养分也将随着群落的演变而发生改变。汾河流域中下游植物群落多样性随水生环境向湿生、中旱生环境的演替而增加,植物群落种类多样化和结构复杂化也随之增加,加速土壤中物质的分解率和生物归还率,促进了土壤物质循环^[25],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。

3.2 植物群落分布与土壤因子的关系

TWINSPAN 的结果客观地反映了调查结果,将调查的 33 个样地分为 8 个群落类型。CCA 排序

结果显示,土壤含水量(SW)、速钾(AK)和速磷(AP)是影响群落分布的主要因子。将 TWINS-PAN 分类的结果标示在 CCA 图中后,样方沿第一轴分为 6 大类群,由于第一轴反映了土壤含水量(SW)的变化趋势,因此这 6 大类群的分布代表了群落沿着水分梯度的变化规律,土壤水分状况成为决定植被类型的主要因素,决定了群落的演替方向。随着土壤水分的降低,群落类型由水生群落逐渐向湿生、中旱生植物群落发展。由此可见,水分环境的变化导致湿地生态系统的变化,引起了植物群落类型的改变。因此,在对汾河流域水资源利用的同时,要注意对汾河流域植被的保护,防止植被类型由湿生植物向草甸群落类型的转变,从而导致汾河流域湿地功能的退化。

CCA 排序同时要求结合物种和环境因子,将样方和环境因子绘在一张图上,这样可以直观看出群落分布与环境因子之间的关系,它有利于排序轴的生态意义解释,能较好地表达群落的环境梯度,是目前较先进的植被与环境关系多元分析技术之一^[26-27]。在本研究中 CCA 前两轴共解释了物种-环境关系方差的 48.7%,显示出较好的排序效果,但是尚有未解释部分,这可能与 CCA 分析中所使用的环境因子为人为测量的结果有关,所选取的环境因子不能全部代表决定群落格局的主要因素。近年来,随着工农业发展,对汾河流域水资源的利用率明显提高,汾河流域污染日益严重,因此人为干扰、水质环境对汾河流域中下游植物群落的分布格局可能产生较大影响。在今后的研究中,应加强这两方面对汾河流域植物群落分布影响的研究,以期对汾河流域的保护和持续利用提供更加详实的参考资料。

参考文献:

- [1] MAGURRAN A E. Ecological diversity and its measurement[M]. New Jersey: Princeton University Press, 1988: 85—86.
- [2] CHEN G SH(陈光升). Analysis on environmental gradients for species diversity of forest community in Xiaozhaizigou Nature Reserve, Sichuan[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*(热带亚热带植物学报), 2010, **18**(2): 182—188(in Chinese).
- [3] ZHANG L X(张丽霞), ZHANG F(张 峰), SHANGGUAN T L(上官铁梁). Vegetation diversity of Luya Mountains[J]. *Chinese Biodiversity*(生物多样性), 2000, **8**(4): 361—369(in Chinese).
- [4] SONG CH Y(宋创业), GUO K(郭 柯), LIU G H(刘高焕). Relationships between plant community's species diversity and soil factors on Otingdag sandy land[J]. *Chinese Journal of Ecology*(生态学杂志), 2008, **27**(1): 8—13(in Chinese).
- [5] XIAO D R(肖德荣), TIAN K(田 昆), ZHANG L Q(张利权). Relationship between plant diversity and soil fertility in Napahai wetland of Northwestern Yunnan Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 2008, **28**(7): 3 116—3 124(in Chinese).
- [6] YANG Y H(杨玉海), CHEN Y N(陈亚宁), LI W H(李卫红). Soil properties and their impacts on changes in species diversity in the lower reaches of Tarim River, Xinjiang, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 2008, **28**(2): 602—611(in Chinese).
- [7] WANG SH ZH(王顺忠), CHEN G CH(陈桂琛), BAI Y P(柏玉平), et al. Interrelation between plant species diversity and soil environ-

- mental factors in bird island of Qinghai Lake[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(1): 186—188 (in Chinese).
- [8] GUO X L (郭秀玲), SHANGGUAN T L (上官铁梁), ZHANG J (张 婕). Quantitative classification and ordination of wetland vegetation from the mouth of Fen River to the Yellow River[J]. *Journal of Wuhan Botanical Research* (武汉植物学研究), 2010, **28**(4): 431—436 (in Chinese).
- [9] FAN Q A (范庆安), PANG CH H (庞春花), ZHANG F (张 峰). Wetland degradation characteristics and restoration strategies in Fenhe River Watershed of Shanxi Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation* (水土保持通报), 2008, **28**(5): 192—194 (in Chinese).
- [10] GE H J (葛宏杰), ZHANG F (张 峰). Vegetation species diversity of wetland in middle and lower reaches of Fenhe River[J]. *Journal of West China Forestry Science* (西部林业科学), 2008, **37**(2): 29—33 (in Chinese).
- [11] SHANGGUAN T L (上官铁梁), JIA ZH L (贾志力), ZHANG F (张 峰), *et al.* Type utilization and protection of vegetation along the bank of Fen River in Shanxi[J]. *Henan Science* (河南科学), 1999, **17**(1): 83—86 (in Chinese).
- [12] WANG H M (王慧敏), PANG CH H (庞春花), ZHANG F (张 峰), *et al.* Interspecific association of dominant species of wetland vegetation in the middle and lower reaches of Fenhe River, Shanxi Province of China[J]. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2012, **31**(10): 2 507—2 512 (in Chinese).
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [14] ZHONG Y L (钟彦龙), WANG Y SH (王银山), XU M (徐 敏), *et al.* Interspecific relationship among the plants in Ebinur Lake Wetland[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment* (干旱区资源与环境), 2010, **24**(5): 153—157 (in Chinese).
- [15] YANG X D (杨晓东), FU D P (傅德平), YUAN Y (袁 月), *et al.* Analysis on interspecific relationship of the dominant plant species in the Ebinur Lake Wetland Nature Reserve, Xinjiang[J]. *Arid Zone Research* (干旱区研究), 2010, **27**(2): 249—256 (in Chinese).
- [16] MA K P (马克平), HUANG J H (黄建辉), YU SH L (于顺利), *et al.* Plant community diversity in Dongling Mountain, Beijing, China: II. species richness, evenness and species diversities[J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 1995, **15**(3): 268—277 (in Chinese).
- [17] 张金屯. 数量生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [18] ZHANG F (张 峰), SHANGGUAN T L (上官铁梁). A study on the numerical classification of wetland vegetations in Luliang Prefecture, Shanxi[J]. *Bulletin of Botanical Research* (木本植物研究), 2000, **20**(3): 355—360 (in Chinese).
- [19] GUO Y P (郭艳萍), ZHANG J T (张金屯), LIU X ZH (刘秀珍). Study on the species diversity of the plant community in Tianlong Mountain, Shanxi[J]. *Journal of Shanxi University* (Nat. Sci. Edi.) (山西大学学报·自然科学版), 2005, **28**(2): 205—208 (in Chinese).
- [20] LEI SH H (雷淑慧), LU A Y (卢爱英), ZHANG X P (张先平), *et al.* Species diversity of forest communities in Pangquangou National Reserve of Shanxi Province, China[J]. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2009, **28**(12): 2 431—2 436 (in Chinese).
- [21] LI X C (李修仓), HU SH J (胡顺军), LI Y T (李岳坦), *et al.* Study on the root distribution and soil water dynamics under *Phragmites* arid area[J]. *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), 2008, **17**(2): 97—101 (in Chinese).
- [22] ROSENZWEIG M L. Species Diversity in Space and Time[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- [23] BART F, HANS DE K, FRANK B. Soil nutrient heterogeneity alters competition between two perennial grass species[J]. *Ecology*, 2001, **82**: 2 534—2 546.
- [24] PATRICK R, STAWBRIDGE D. Variation in the structure of natural diatom communities[J]. *American Naturalist*, 1963, **97**: 51—57.
- [25] YANG X B (杨小波), ZHANG T L (张桃林), WU Q SH (吴庆书). The relationship between biodiversity and soil fertility characteristics on abandoned fields in the tropical region of Southern China[J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2002, **22**(2): 190—196 (in Chinese).
- [26] TER BRAAK C J F. Canonical correspondence analysis: a new eigenvector method for multivariate direct gradient analysis[J]. *Ecology*, 1986, **67**: 1 167—1 179.
- [27] ZHANG J T (张金屯). Fuzzy set ordination and its application[J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 1992, **12**(4): 325—331 (in Chinese).