

三江平原沟渠网络结构对区域景观格局的影响

卢 涛^{1,2}, 马克明^{1,*}, 傅伯杰¹, 倪红伟³

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院成都生物研究所, 成都 610041
3. 黑龙江省科学院自然资源研究所, 哈尔滨 150040)

摘要: 农业开发进程中产生的沟渠作为农业景观中廊道内部的动因主体, 会对周围自然生态系统产生不同程度的影响; 同时沟渠网络的形成, 又使得这种影响作用更加深入和复杂。以根据三江平原建三江管局辖区 2004 年的 Landsat-TM 卫星影像解译的土地利用现状图以及沟渠分布水利图为基础资料, 在地理信息系统 (GIS) 支持下, 选择 3 个 $30 \times 30 \text{ km}^2$ 的取样区为研究对象, 分析了各样区的景观结构特征和沟渠网络结构。在此基础上, 用典范相关分析 (CCA) 定量研究了沟渠网络结构对于区域景观格局的影响。结果表明: 沟渠网络的结构对区域景观格局有显著影响, 沟渠密度越大, 网络结构越复杂, 则区域景观中斑块数目越多, 平均斑块面积越小; 同时农业用地所占比例越大, 自然湿地所占比例越小。通过各沟渠网络结构指标与 CCA 排序轴的相关性分析发现, 对区域景观格局影响最大的指标是沟渠密度, 其次是线点率和环度, 而反映沟渠网络连通性的连通度指标影响相对较小。

关键词: 沟渠; 网络结构; 景观格局; CCA 排序; 三江平原

文章编号: 1000-0933(2008)06-2746-07 中图分类号: Q149, X171.1 文献标识码: A

Effects of ditch network structure on landscape pattern in the Sanjiang Plain, Northeast China

LU Tao^{1,2}, MA Ke-Ming^{1,*}, FU Bo-Jie¹, NI Hong-Wei³

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Centre for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

3 Institute of Natural Resources, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin 150040, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(6): 2746 ~ 2752.

Abstract: Agricultural development is arguably the most dramatic form of land transformation with profound impacts on the natural environment. Therefore, the relationship between agricultural activities and landscape patterns and its regulation are important research topics of ecology. However, to date, studies on agricultural drainage ditches, which are critical agricultural landscape components, are still weak, and few published studies have assessed the effects of drainage ditch network structure on landscape pattern, yet such information is urgently needed for the conservation of wetland ecosystems under intensive cultivation. Based on a land utilization map created from a Landsat-TM satellite image from 2004 and a map of a ditch network system in the study area, we used landscape spatial pattern analysis on a GIS platform to assess the landscape pattern. Several indices reflecting ditch network characteristics, such as ditch density and α , β , γ index were

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40671182); 国家自然科学基金委创新研究群体科学基金资助项目 (40621061)

收稿日期: 2007-04-17; **修订日期:** 2007-11-30

作者简介: 卢涛 (1975 ~), 男, 四川成都人, 博士, 主要从事植被生态学、景观生态学研究. E-mail: lutao@cib.ac.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mkm@rcees.ac.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40671182); The Innovation Research Group supported by the National Natural Sciences Foundation of China (No. 40621061)

Received date: 2007-04-17; **Accepted date:** 2007-11-30

Biography: LU Tao, Ph. D., mainly engaged in plant ecology and landscape ecology. E-mail: lutao@cib.ac.cn

also calculated. Three sample sites with $30 \times 30 \text{ km}^2$ were selected to compare landscape pattern and ditch network structure among them. The Canonical Correspondence Analysis (CCA) method was used to identify the correlation between ditch network structure and landscape pattern. Our results showed that ditch network structure had significant effect on landscape pattern. With the complexity of network structure increasing, an increase of patch number was paralleled with a decrease of patch area; an increase of human dominated land use types was paralleled with an increasing loss of wetlands. Indices reflecting complexity of ditch network structure, such as ditch density and circuitry had close relationships with landscape pattern, while connectivity had less effect on landscape pattern. Our results also indicated that the method of CCA analysis was a suitable method to quantitatively assess the relationship between landscape pattern and ditch network structure.

Key Words: ditch; network structure; landscape pattern; CCA; Sanjiang Plain

农业开发作为最主要的人类活动形式,会对自然生态系统和景观带来深刻影响^[1]。农业开发所造成的景观同质化、破碎化以及景观整体质量的退化常常是人类活动对景观要素及其空间配置持续作用的结果^[2,3],并且这些影响会直接或间接地导致生物多样性的退化和丧失,进而将危害人类的生存质量和可持续发展能力^[4]。因此,研究农业开发所形成的农业景观及其组分的生态环境效应成为生态学研究中的重要方面。但到目前为止,对于作为农业景观中重要组分的沟渠的研究相对较少。沟渠作为农业景观中廊道内部的动因主体,会对周围自然生态系统产生不同程度的影响。同时,沟渠在空间上的布局和扩展具有规律性,这使得沟渠及其所形成的网络在客观上构成了人类农业开发活动对生物多样性干扰的策源地。沟渠所产生的生态过程分为直接和间接影响,尺度也从种群一直到景观。目前对于沟渠的研究,主要集中在沟渠对非点源污染物的去除效应^[5,6]、对水文格局的影响^[7]以及对景观造成的破碎化上^[8],而有关沟渠网络结构与景观格局之间关系的定量研究,则未见报道。

景观格局分析是景观生态学研究的基本内容,数量化分析景观组分的空间分布特征,是进一步研究景观功能和动态的基础,也是探讨景观格局和生态过程相互关系的基础^[9~11]。景观格局决定景观功能,景观功能的改变又势必体现在景观格局的变化上;特定时期和区域的景观格局既是具体生态过程的产物,也影响着未来生态过程的发展变化^[12,13]。因此,对于沟渠作为主要组分的景观而言,探讨适合的方法来量化沟渠对景观格局的影响就显得尤为重要。沟渠网络的形成,也使得沟渠对区域景观格局的驱动机制分析需进一步加强。网络分析是运筹学的一个分支,其主要运用图论方法研究各类网络的结构及其优化问题^[14]。沟渠网络可视为由节点和沟渠连线组成的图论意义下的网络,因此可以进一步定量地测度它们的拓朴结构、连通性以及复杂性等指标。

三江平原是我国最大的内陆平原淡水沼泽湿地分布区,也是湿地丧失最为严重的区域之一。从 20 世纪 50 年代开始,三江平原湿地由于大规模农业开发,致使沼泽湿地面积急剧减少了 80% 以上^[15]。三江平原农业开发的主要途径是开挖排水沟渠,排干湿地造田。因此三江平原的排水渠网十分发达,加之由于开发强度上的差异,使得不同区域的沟渠网络结构存在着较大差异,这为本研究提供了理想的研究对象。目前对于三江平原农田-湿地复合景观的结构了解尚不充分,尤其是沟渠这种景观要素对区域景观格局的影响机制认识还很匮乏。另外,沟渠在直接改变景观格局的同时还广泛地影响着景观过程,不同的沟渠网络结构正是不同生态过程的反映。然而以往针对沟渠的研究常常局限于对景观空间分布格局的描述和分析,缺乏格局与过程之间联系的建立,这无疑阻碍了对格局变化生态学意义探讨的深入。因而研究沟渠网络结构对区域景观格局的影响,并通过景观特征与特定沟渠网络结构特征关系的量化,来度量基于沟渠的某些生态过程状况,将有助于更好地理解区域景观的生态环境状况,对于开展湿地研究、保护以及恢复具有重要意义。

1 研究区域

研究区选择在三江平原腹地的黑龙江农垦总局建三江管局辖区。该区位于富锦、同江、抚远、饶河两市两县交界处,东经 $132^{\circ}31'26'' \sim 134^{\circ}22'26''$,北纬 $46^{\circ}49'42'' \sim 48^{\circ}13'58''$ 之间,系黑龙江、松花江、乌苏里江汇流的

河间地带,总面积 $1.23 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。年平均气温 $1 \sim 2^\circ\text{C}$,年降雨量 $500 \sim 600 \text{ mm}$ 。区域平均海拔约 60 m ,地势平坦,原本绝大部分地区均为平原沼泽,但现在多数已被开发为农田。

2 研究方法

2.1 基础数据

本研究以建三江地区 2004 年 6 月 4 日的 TM 影像为基础信息源,辅助信息有 1:50000 地形图以及 2002 年 1:100000 水利图。图像解译在 Arcview 3.2 和 Arcinfo 9.0 软件中进行。根据研究需要,将区域景观类型划分为水田、旱田、沟渠、沼泽、草甸、草地、居民点以及道路 8 类。

根据研究区沟渠的大致分布,分别在低密度、中密度以及高密度区域各选择一个 $30 \text{ km} \times 30 \text{ km}$ 大小的区域作为取样区(图 1)。每个样区在位置选择时,保持各样区内沟渠系统的独立性。本研究所选择的 3 个样区中,高密度区属于别拉洪河上游,中密度区属于浓江流域,而低密度区则属于别拉洪河下游。需要特别指出的是,由于沟渠对水流的改道作用,别拉洪河上、下游沟渠已不连通,而是分别属于两个独立的系统。为了使样本数量符合统计要求,将每个取样区划分成 9 个 $10 \times 10 \text{ km}^2$ 的小单元。然后分别以 3 个取样区以及 27 个小单元格为对象,计算沟渠网络的结构指标及景观结构指标。

2.2 沟渠网络结构分析

根据蔡婵静等的方法,选择沟渠密度作为沟渠结构的指标^[16]。沟渠密度指数用单位面积上的沟渠总长度来表示^[11]。需要指出的是,由于研究区内高级别的沟渠(宽度 30 m 左右)数量非常有限,加之影像分辨率较低,低级别沟渠(5 m 以下)又无法识别。因此结合区域沟渠水利分布图后,能解译出的绝大多数沟渠都属于中

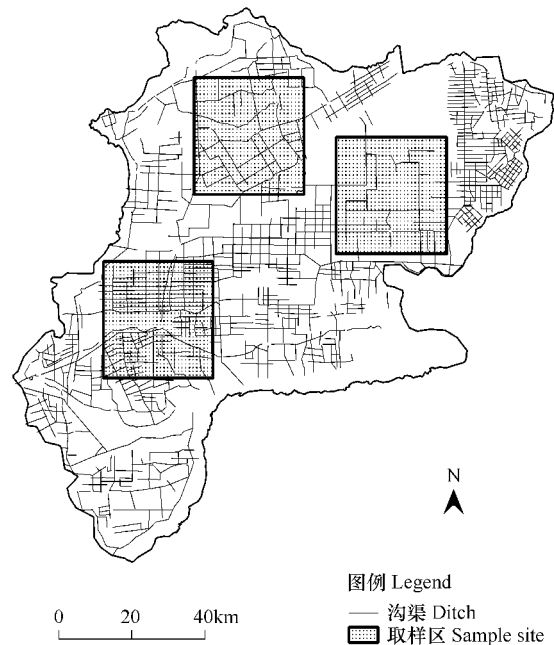


图 1 研究区主要沟渠分布图及 3 个取样区位置

Fig. 1 The main ditch pattern in the study area and the locations of three sample sites

等级别,即宽度为 10 m 左右。基于此本研究在计算沟渠密度时,只采用了沟渠的长度,而对宽度未加以考虑。

另外,根据 Forman 和 Godron 的方法,采用环度、线点率以及连通度指标来衡量沟渠网络的结构^[11]。其中环度采用 α 指数测量,它表示的是网络中能流、物流或物种迁移路线的可选择程度,是网络复杂程度的一个很好指标^[11,17,18]。 α 指数的计算公式为:

$$\alpha = (L - V + 1) / (2V - 5)$$

式中, L 为连接沟渠数; V 为节点数。 α 值的变化范围为 $0 \sim 1$ 。当 $\alpha = 0$ 时,表示网络无环路;当 $\alpha = 1$ 时,表示网络具有最大可能的环路数^[19]。

线点率也称 β 指数,是指网络中每个节点的平均连线数:

$$\beta = L / V$$

β 指数的数值范围为 $0 \sim 3$ 。 $\beta = 0$ 时表示无网络存在; β 值增大,表示网络内每一节点的平均沟渠连数增加,网络复杂性增强^[20]。

网络连通度是用来描述网络中所有节点被连接的程度,即一个网络中连接沟渠数与最大可能连接沟渠数之比,常用 γ 指数测度:

$$\gamma = L / 3(V - 2)$$

γ 指数的变化范围为 $0 \sim 1$ 。 γ 为 0 时,表示没有节点相连,网络连通性最低; γ 为 1 时,表示每个节点都彼

此相连,网络连通度最高^[19]。

2.3 景观格局分析

景观指数能够高度浓缩景观格局信息,反映其结构组成和空间配置等方面特征^[14]。本研究中主要选取的指数有斑块数量、平均斑块大小、Shannon 多样性指数、Shannon 均匀度指数、斑块类型丰富度以及各景观类型所占面积百分比。在 Arcview 3.2 界面中,分别在 3 个 30 × 30km²的取样区中以及 27 个 10 × 10km²的小单元格中,应用 Patchgrid 插件中的 Spatial statistics 命令,计算各格网内的景观指数。

2.4 沟渠网络结构对景观格局的影响分析

为了量化沟渠网络结构对区域景观格局的影响,选择典范相关分析(CCA)探讨二者的关系,而不是通常研究所采用的回归分析。主要是因为本研究中所选用的景观格局指标之间以及沟渠结构指标之间都存在着相关,而回归分析的基本假设就是变量之间是独立的^[21],而 CCA 排序分析可以很好地解决这个问题^[22]。以 27 个小单元为样本,在分别计算了各单元格内的沟渠网络结构指标及景观格局指数后,建立景观格局矩阵和沟渠结构指标矩阵。分析前,对两个矩阵均进行了标准化处理,以消除量纲的差别。CCA 分析及绘图在 CANOCO 4.5 中进行^[23]。

3 结果与分析

3.1 各取样区的沟渠网络结构分析

分别在 3 个 30 × 30km²的取样区中,对渠道网络的长度、节点数、互不连接数、连线数进行测定(图 2)。在此基础上,通过计算密度、线点率、环度以及连通度,分析不同取样区间沟渠网络结构特征的差异(表 1)。

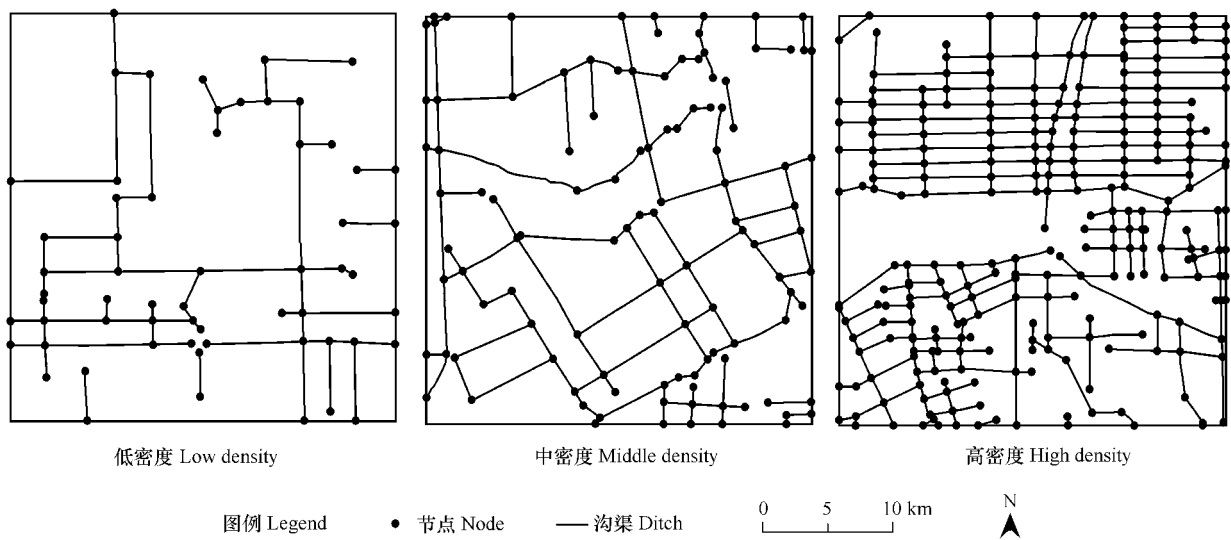


图 2 各取样区沟渠的节点示意图
Fig. 2 The node patterns of ditches in three sample sites

表 1 各取样区的沟渠网络结构特征

沟渠网络指标 Ditch network index	取样区 Sample site		
	低密度 Low density	中密度 Middle density	高密度 High density
密度 Density (km/km ²)	0.24	0.38	0.76
线点率 Ratio of line to node	0.95	1.07	1.34
环度 Circuitry	0	0.04	0.17
连通度 Connectivity	0.33	0.37	0.45

从沟渠网络的结构来看,所选择的 3 个取样区中,低密度样区的沟渠密度仅为 0.24km/ km²;高密度样区

最高,达 $0.76\text{km}/\text{km}^2$;中密度样区居于二者之间,为 $0.38\text{km}/\text{km}^2$ 。低密度样区的线点率为 0.95,中密度为 1.07,而高密度样区则达到 1.34。这说明低密度取样区中沟渠的网络结构最为简单,每一节点的平均沟渠连线数最低,节点间的流通效率也较其它两个样区的沟渠网络差。环度指标也表现出相同的规律性,其值在低密度样区为 0,中密度样区为 0.04,仅为高密度样区的 1/4。这说明低密度样区内沟渠网络的回路相比其它两个样区少,结构也较其它两个样区简单。连通度指标如其它指标一样,按相同的趋势变化。

通过对沟渠网络结构的分析,可以看出,从沟渠网络结构的复杂程度来看,低密度取样区最低,中密度次之,而高密度取样区最高。

3.2 各取样区内的景观结构特征

从各取样区内各景观要素类型所占的面积百分比来看,水田、旱田、草甸和草地均是最主要的景观类型,但各区中这几种类型所占比例仍有较大差别(表 2)。对耕地(水田和旱田)来说,高密度取样区内的面积最大,二者所占面积百分比总和高达 85.3%,而这两种类型所占比例在中密度区为 33.4%,在低密度区则仅为 28.0%。对湿地类型(沼泽和草甸)来说,则是相反的趋势,其在低密度取样区达 42.9%,中密度区为 40.2%,而高密度区则仅有 4.7%。草地同湿地类型一样呈相同的趋势变化。

表 2 各取样区的景观结构特征对比

Table 2 Comparison of landscape characters in each sample site

取样区 Sample site	特征参数 Index	景观要素类型 Landscape type							
		水田 PL	旱田 DL	沟渠 DH	沼泽 MS	草甸 MD	草地 GL	居民点 RA	道路 RD
低密度 Low density	面积 CA(km^2)	83.7	168.0	10.2	96.9	289.9	244.9	3.8	2.6
	比例 PLAND(%)	9.3	18.7	1.1	10.7	32.2	27.2	0.4	0.3
中密度 Middle density	面积 CA(km^2)	87.7	213.0	17.8	43.0	318.4	210.5	3.6	5.9
	比例 PLAND(%)	9.7	23.7	2.0	4.8	35.4	23.4	0.4	0.7
高密度 High density	面积 CA(km^2)	337.3	430.2	37.5	—	42.5	40.1	8.3	4.1
	比例 PLAND(%)	37.5	47.8	4.2	—	4.7	4.5	0.9	0.5

CA: Area; PLAND: Percentage of Landscape; PL: Paddy land; DL: Dry land; DH: Ditch; MS: Marsh; MD: Meadow; GL: Grass land; RA: Residential area; RD: Road

3.3 各取样区的景观格局特征

各取样区的景观格局特征见表 3。可以看出,从低密度区到高密度区,随着沟渠密度的增加以及沟渠网络结构复杂性的增强,景观斑块数目增加,平均斑块面积缩小。这主要是因为随着沟渠密度的增大以及网络复杂性的增强,原来较大的自然景观斑块必然会被割裂成为许多大小不同的小斑块,从而导致区域景观破碎化程度加剧。

低密度、中密度以及高密度取样区的景观多样性指数分别为 1.66、1.56 和 1.20;均匀度指数分别为 0.72、0.71 和 0.62。无论是香农多样性指数还是均匀度指数,均呈下降趋势。景观要素类型的丰富度也随沟渠网络结构复杂性的增加而下降。这些表明随着沟渠网络结构复杂性的增加,景观的异质程度在下降,景观类型有向单一化或非均衡化方向发展的趋势。这主要是由于人类定向选择的农业开发活动造成许多原有自然湿地景观退化或直接消失转变为农田的结果。

表 3 各取样区的景观格局总体特征

Table 3 Overall features of landscape patterns in each sample site

取样区 Sample site	斑块数 NP	平均斑块面积(km^2) MPS	丰富度指数 RI	多样性指数 SHDI	均匀度指数 SHEI
低密度 Low density	721	124.83	8	1.66	0.72
中密度 Middle density	1288	69.88	8	1.56	0.71
高密度 High density	1520	59.21	7	1.20	0.62

NP: Number of patch; MPS: Mean patch size; RI: Richness index; SHDI: Shannon's diversity index; SHEI: Shannon's evenness index

3.4 沟渠网络结构对景观格局的影响

不同取样区景观格局特征上的差别是沟渠网络结构、功能的差异所引起的,至少二者之间存在一定的内在联系。为了定量研究沟渠网络结构对区域景观格局的影响,将所用的反映沟渠网络结构的主要指标与反映景观格局特征的指标作了典范相关分析(CCA)。

表 4 沟渠网络结构指标与排序轴的相关性
Table 4 Intra-set correlations of ditch network index with the four axes of CCA

沟渠网络结构指标 Ditch network index	景观格局 Landscape pattern			
	第一轴 Axis 1	第二轴 Axis 2	第三轴 Axis 3	第四轴 Axis 4
密度 Density	-0.816 **	0.250	0.031	0.063
线点率 Ratio of line to node	-0.717 **	0.253	0.280	0.050
环度 Circuitry	-0.541 *	0.334	0.224	0.202
连通度 Connectivity	-0.221	0.703 **	0.200	-0.024

* $P < 0.01$; ** $P < 0.001$

CCA 分析结果表明,区域景观格局与沟渠网络结构之间存在显著相关性。景观格局与沟渠网络结构之间的 CCA 排序中,排序轴的总特征值为 0.656,其中前两个排序轴的特征值分别为 0.234 和 0.062,累计百分比分别为 71.6% 和 90.4%。景观格局和沟渠网络结构二者之间的关系超过 70% 体现在第一排序轴上,这说明 CCA 第一轴集中了所有排序轴所反映的绝大部分信息。因此,典范相关分析的结果能够很好地解释景观格局与沟渠网络结构指标之间的相关关系,同时也表明沟渠网络结构对区域景观格局有着显著影响。

从表 4 可以看出,沟渠网络结构指标与 CCA 排序第一轴的相关性最大,且这些指标均与第一轴呈负相关。与 CCA 第一轴相关性最大的沟渠网络结构指标是密度,其次是线点率和环度,而网络连通度相关性最小。因此,根据各指标的含义及与排序轴的相关性,可以看出 CCA 排序第一轴主要反映的是沟渠网络的复杂程度。

典范相关分析(CCA)的结果以二维平面图的形式直观地展示了景观格局与沟渠网络结构之间的对应关系(图 3)。其中三角形代表的是排序所采用的 13 个景观格局指标,而带箭头的线段则表示的是 4 个沟渠网络结构指标。从 CCA 排序图中可以看出,沼泽(MS)、草甸(MD)、草地(GL)、斑块丰富度(PR)、平均斑块面积(MPS)、多样性指数(SDI)以及均匀度指数(SEI)均与 CCA 第一轴呈正相关,而其它几个景观格局指标则呈负相关。沟渠网络结构指标与排序第一轴均呈负相关。这说明随着所选择的沟渠网络结构指标的增大,沼泽、草甸以及草地所占的面积百分比下降,斑块丰富度、平均斑块面积、多样性指数及均匀度指数同样下降;而水田(PL)、旱田(DL)、斑块数(NUMP)等其它几个景观指标则增加。

4 讨论

本研究表明,三江平原农业开发进程中形成的沟渠网络的结构对区域景观格局有显著影响。随着沟渠网络结构复杂程度的增加,斑块数量及水田、旱田所占面积百分比增加,而自然景观(沼泽和草甸)所占面积百分比则在下降,平均斑块面积以及景观多样性也在下降。在表征沟渠网络结构的 4 个指标中,沟渠密度与景观格局的关系最密切,线点率和环度指标次之,而反映沟渠网络连通程度的连通度指标与景观格局的相关性最低。因此,对于三江平原来说,湿地景观的维持与保护,以及景观格局的优化,控制区域沟渠的密度是关键。

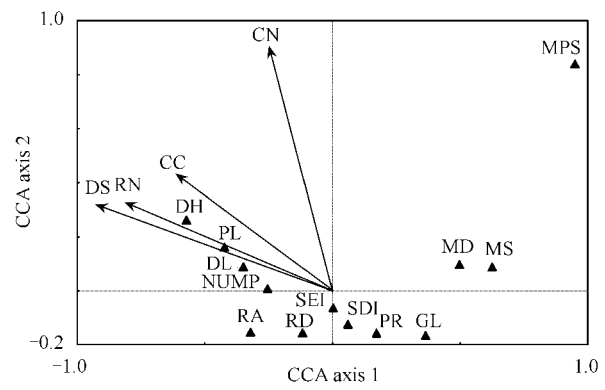


图 3 景观格局与沟渠网络结构的 CCA 排序结果
Fig. 3 CCA ordinations of the relationship between landscape pattern and ditch network structure
DS: Density; RN: Ratio of line to node; CC: Circuitry; CN: Connectivity; the other abbreviations are the same as the above

典范相关分析(CCA)作为一种排序方法,虽然以往多用于植被-环境关系的研究,但通过本研究可以看出,对于类似景观格局驱动机制之类的多变量因子,且因子间互相不独立的情况下,CCA 排序能体现出其的优越性,具有较好的应用前景。

References:

- [1] Nagashima K, Sands R, Whyte A G D, *et al.* Regional landscape change as a consequence of plantation forestry expansion: an example in the Nelson region, New Zealand. *Forest Ecology and Management*, 2002, 163: 245—261.
- [2] Western D. Human-modified ecosystems and future evolution. *Proceedings of national academy of sciences, USA*, 2001, 98: 5458—5465.
- [3] Zhou H F, Fu B J. Ecological structure of landscape and biodiversity protection. *Scientia Geographica Sinica*, 1998, 18 (5): 472—478.
- [4] Lu Y H, Chen L D, Fu B J. The analysis of human activities and landscape patterns at the county level. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24 (9): 1833—1838.
- [5] Jiang C L, Cui G B, Fan X Q, *et al.* Purification capacity of ditch wetland to agricultural non-point pollutants. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2004, 25 (2): 125—128.
- [6] Bouldin J L, Farris J L, Moore M T, *et al.* Vegetative and structural characteristics of agricultural drainages in the Mississippi Delta. *Landscapes Environmental Pollution*, 2004, 132 (3): 403—411.
- [7] Adrian A. DITCH: a model to simulate field conditions in response to ditch levels managed for environmental aims. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2000, 77: 179—192.
- [8] Liu H Y, Zhang S K, Lu X G. Processes of wetland landscape changes in Naoli River Basin since 1980s. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17 (6): 698—705.
- [9] Naveh Z, Lieberman A S. *Landscape Ecology: Theory and Application*. New York: Springer-Verlag, 1984.
- [10] Ma K M, Fu B J. Landscape pattern and fragmentation in Donglinshan montane region. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24 (3): 320—326.
- [11] Forman R T T, Godron M. *Landscape Ecology*. New York: John Wiley and Sons, 1986.
- [12] Turner M G. Spatial and temporal analysis of landscape patterns. *Landscape Ecology*, 1990, 4 (1): 21—30.
- [13] Husshoff R M. Landscape indices describing a Dutch landscape. *Landscape Ecology*, 1995, 10 (2): 101—111.
- [14] Wu J G. *Landscape Ecology: Pattern, Process, Scale and Hierarchy*. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [15] Liu H Y, Zhang S K, Lu X G. Wetland landscape structure and the spatial-temporal changes in 50 years in the Sanjiang Plain. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59 (3): 391—400.
- [16] Cai C J, Zhou Z X, Cheng F, *et al.* The landscape patterns of the green corridors in Wuhan City, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26 (9): 2996—3004.
- [17] Forman R T T, Gordon M. Patches and structural components for a landscape ecology. *BioScience*, 1981, 31(10): 733—740.
- [18] Forman R T T. Some general principles of landscape and regional ecology. *Landscape Ecology*, 1995, 10 (3): 133—142.
- [19] Hagget P, Cliff A D, Fry A. *Locational Analysis in Human Geography*. New York: Wiley, 1977.
- [20] Hagget P, Chorley R J. *Network Analysis in Geography*. London: Edward Arnold, 1972.
- [21] Draper N, Smith H. *Applied regression analysis*, 2nd edition. New York: Wiley, 1981.
- [22] Timothy M B, Louis B B, Kathryn E F, *et al.* Effects of landscape structure on nest predation in roadsides of a midwestern agroecosystem: a multiscale analysis. *Landscape Ecology*, 2000, 15: 131—143.
- [23] ter Braak C J F, Smilauer P. *CANOCO Reference manual and CanoDraw for Windows User's guide: Software for Canonical Community Ordination (version 4.5)*, Microcomputer Power, New York: Ithaca, 2002.

参考文献:

- [3] 周华锋,傅伯杰. 景观生态结构与生物多样性保护. *地理科学*, 1998, 18(5): 472~478.
- [4] 吕一河,陈利顶,傅伯杰. 县域人类活动与景观格局分析. *生态学报*, 2004, 24(9): 1833~1838.
- [5] 姜翠玲,崔广柏,范晓秋,等. 沟渠湿地对农业非点源污染物的净化能力研究. *环境科学*, 2004, 25(2): 125~128.
- [8] 刘红玉,张世奎,吕宪国. 20 世纪 80 年代以来挠力河流域湿地景观变化过程研究. *自然资源学报*, 2002, 17(6): 698~705.
- [10] 马克明,傅伯杰. 北京东灵山地区景观格局及破碎化评价. *植物生态学报*, 2000, 24 (3): 320~326.
- [14] 邬建国. *景观生态学——格局、过程、尺度与等级*. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [15] 刘红玉,张世奎,吕宪国. 三江平原湿地景观结构的时空变化. *地理学报*, 2004, 59(3): 391~400.
- [16] 蔡婵静,周志翔,陈芳,等. 武汉市绿色廊道景观格局. *生态学报*, 2006, 26(9): 2996~3004.