

鲁东山区流域景观格局与面源污染关联关系

王孟文¹, 齐伟¹, 王鹏涛², 王卓然¹

(1. 山东农业大学资源与环境学院, 泰安 271018;
2. 西安外国语大学旅游学院人文地理研究所, 西安 710128)

摘要: 基于实地监测和3S技术,以鲁东低山丘陵地区栖霞市为研究区,采用Spearman相关、非约束性PCA、对应典范分析(CCA)等方法,研究不同流域尺度下景观格局与面源污染的关联关系。结果表明:(1)研究区景观格局空间分异明显,在特征尺度下农用地和建设用地斑块较为破碎,林地、园地斑块聚集性强。(2)研究区河流水源污染物主要以TN为主,EC、COD污染次之,主河道出水口为污染较为严重的区域。(3)景观格局对水质的影响丰水期要大于平水期,TN和EC对土地利用类型面积比例和景观格局指数的变化最为敏感。(4)平水期河岸带尺度下景观格局对TN影响最大的为斑块密度,EC受景观边缘密度影响最大,小流域尺度TN受景观蔓延度影响最大,COD与景观多样性关系密切;丰水期河岸带尺度景观多样性对TN影响最大,EC受斑块聚合度影响最大,小流域尺度影响TN最大的因素与平水期一致,EC与景观蔓延度关系密切。(5)小流域景观类型水平下,TN主要受林地斑块密度影响,TP与耕地散布与并列指数关系密切;丰水期TN受林地散布与并列指数影响显著,TP对林地平均分维数变化敏感,EC受草地聚集性影响最大。本文分析了研究区景观格局与面源污染空间分布特征,探讨了两者在不同尺度下的相关性,可为栖霞市水土资源可持续利用提供科学依据。

关键词: 鲁东山区;景观格局;面源污染;关联关系

面源污染(non-point source pollution, NPSP),又称非点源污染,一般是指区域大气地面和土壤累积的污染物随降雨引起的地表径流、淋洗、土壤侵蚀以及城市、农田排水进入受纳水体,引起水体悬浮物浓度升高、溶解氧减少、富营养化,破坏水生态环境平衡,继而影响水生生物多样性以及人类汲水安全的污染类型^[1]。面源污染已成为我国地表水体的主要污染途径^[2-4]。与点源污染相比,面源污染具有隐蔽性、不确定性、滞后性、污染源复杂、污染广泛同时污染规模大,治理难度大等特点^[5-6],逐渐引起生态学、环境学以及水文领域学者的重视。

人类对土地利用系统的不断改造与影响,导致地表植被类型和景观格局发生变化,进一步影响地表径流,从而对面源污染物的流向和流量产生一定的截留和加速作用,最终影响流域河流水质^[7-11]。不同的土地利用类型组合,在不同坡度下导致地表径流、冠层存储、下渗以及土壤水力特性发生变化,是影响集水区水文过程和面源污染等过程的关键因素^[12]。土地利用类型与河流水源污染密切相关,其中尤以农业用地及林地与其关系最为密切:雨季的农田排水是水质富营养化的主要原因^[14],而林地对面源污染具有显著

收稿日期: 2019-05-24; 修订日期: 2020-02-17

基金项目: 国家社会科学基金项目(19ZDA096); 国家自然科学基金项目(41271369)

作者简介: 王孟文(1983-),男,山东泰安人,博士,讲师,研究方向为景观生态与土地可持续利用。

E-mail: tsuls_wmw@163.com

通讯作者: 齐伟(1970-),男,山东泰安人,博士,教授,博士生导师,研究方向为景观生态学。

E-mail: qiwei@sdau.edu.cn

的截留作用^[13]。因此,景观空间的优化配置可作为流域水环境管理的有效措施之一,而景观格局指数在不同尺度与水质的相互关系将会是今后研究的热点^[15]。“源”“汇”类型数量的相对大小以及不同缓冲区距离对水质影响不同,为减少这种影响,必须针对研究区不同尺度有选择的应用^[16]。

目前景观格局与流域面源污染的相关性研究,大多停留在土地利用类型或景观格局指数与水质的简单线性相关上^[17,18],对于不同尺度下的景观格局与面源污染过程相关性研究较少,对于多等级流域尺度研究较少^[19],不同景观组分在不同区域内对水质影响存在非线性和阈值响应,同时存在不同的尺度效应。对于不同土地利用类型和景观格局对面源污染的贡献量研究缺乏^[20]。综合文献发现,当样方数据较多时,传统的线性相关、回归分析等方法不能够清晰合理地解释各种变量间的关系,各自然要素间通常不存在简单的线性关系,因此需要一个能够直观地表达复杂变量间关系的数量统计方法,而对应典范分析(CCA)不但能清晰地揭示各变量间的关系,同时能够分析因变量对自变量的解释贡献率^[21,22]。

由于面源污染的实地监测困难,大部分景观格局与面源污染的相关性研究中污染物浓度主要是通过各类分布水文模型(如SWAT、SWMM)和半经验模型(如SPARROW)^[23-25],或者使用输出系数模型及实物排放核算法^[26,27]进行模拟。但是面源污染过程复杂,模型各类空间输入数据的精度以及非本土化的参数设定都会导致模型存在极大的不确定性。同时,模型输出结果的精确参数率定也需要连续监测数据的支持。因此采用3S技术和实地监测有机结合是研究景观格局与面源污染过程相互关系的有效途径之一。总之,探讨不同尺度的下垫面格局对面源污染过程的相关性以及贡献量能够从根本上揭示面源污染过程机理,对面源污染的防控从土地系统优化配置这个可操作性的角度起到了关键性的作用。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

山东省栖霞市位于山东胶东半岛腹地,总面积2016 km²,平均海拔178.72 m,有“六山一水三分田”之称,属于典型的低山丘陵地区(图1)。栖霞市境内河流属于季风雨源型山溪性河流,水流量受降雨量影响而消涨枯旺。境内有大小河谷3653条,河流114条。主要有清水河、杨础河、漩河以及白洋河、清阳河、黄水河等六大水系。近几年,栖霞市针对点源污染采取多种措施取得良好收效^[28],但作为我国苹果主产地,果农大量施用有机肥和波尔多液等加剧了流域面源污染。同时,由于化肥施用过浅,使得肥料在地表径流的作用下大量流失^[29]。

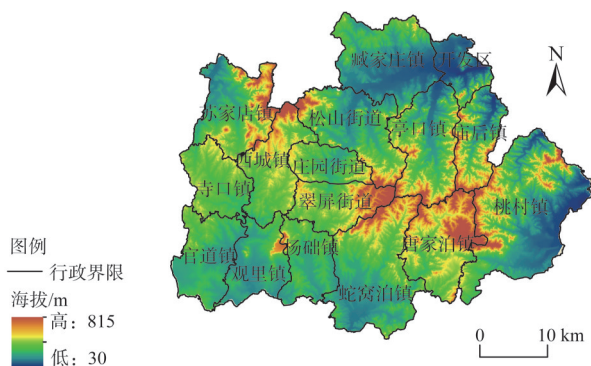


图1 研究区行政区划与数字高程
Fig. 1 Administrative divisions and the digital elevation map of the study area

1.2 数据与方法

1.2.1 数据来源及处理

从地理空间数据云网站 (www.gscloud.cn) 获取 2016 年 8 月 Landsat8 OLI 遥感影像及数字高程影像 (GDEMDEM), 利用 ENVI 5.1 软件进行辐射定标及大气校正, 结合谷歌地球影像和实地调查, 采用监督分类方法将栖霞市土地利用类型分为草地、林地、园地、耕地、建设用地和未利用地六种土地利用类型 (图 2), 对 GDEMDEM 通过镶嵌裁剪获得栖霞市 DEM (图 1), 解译后的土地利用现状图和数字高程影像统一采样成 30 m 分辨率。参考相关地面资料, 经 kappa 精度检验为 0.91, 符合研究要求。

使用 ArcGIS 10.1 水文分析工具, 以栖霞市数字高程为基础数据, 根据实地情况将栖霞市境内划分 21 个小流域 (图 3)。考虑河流面源污染程度受区域降水量、距流域入水口距离以及不同土地利用类型和景观格局的配置影响, 本课题组分别于 2016 年 5 月 (平水期) 及 8 月 (丰水期) 在栖霞境内河流干支流及小流域内支流汇入处、居民点、旅游景点、水源地、养殖场、果园、耕地等不同土地利用类型组成的小流域内的 61 个采样点进行水质取样 (图 3)。

选取不同监测点河道总氮 (TN)、总磷 (TP)、铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、化学需氧量 (COD)、电导率 (EC) 作为面源污染过程反应变量, 按照《水和废水监测分析方法》(第四版), 采用过硫酸钾氧化法测定总氮 (TN), 采用钼酸铵法测定总磷 (TP), 电导率 (EC) 使用电导率仪测定, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 用连续流动分析仪进行测定, COD 采用库仑法进行测定。

1.2.2 景观格局指数及尺度选取

流域作为水文过程及其伴生过程的重要承载单元, 土壤水文和碳氮循环及其交互作用影响着生物生产力、物质能量传输、生态环境质量等问题。考虑不同尺度的流域划分中水一面源污染物耦合过程、格局和机制不同以及不同等级流域尺度和景观特征尺度的影响。选取栖霞境内 5 条河岸带及小流域两种尺度作为研究尺度。利用 ArcGIS 10.1 对土地利用现状图中耕地 (AGRL)、林地 (FRST)、建设用地 (URBN)、园地 (ORCD)、

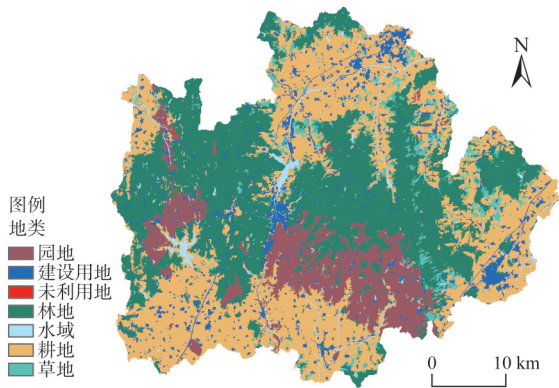
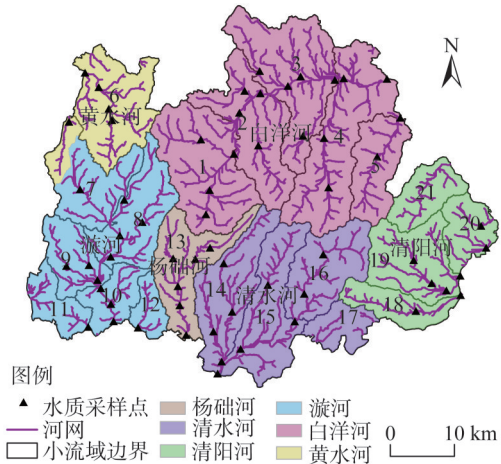


图 2 栖霞市土地利用现状
Fig. 2 The land use map of Qixia city



注: 1~21 为栖霞市境内小流域编号, 下同。

图 3 栖霞市小流域及采样点分布
Fig. 3 The distribution map of river basins and sampling points in Qixia city

草地 (PAST) 面积比例进行统计。同时, 考虑栖霞市景观格局的特征尺度, 首先对土地利用现状图分 20~270 m 范围内, 间隔 10 m 获取重采样图像, 根据面积信息守恒公式计算发现 30 m 为研究区最佳粒度尺度。选取 500 m、1000 m、1500 m、2000 m 幅度尺度以移动窗口法进行指数曲线拟合, 发现 1500 m 最佳幅度尺度。依此, 选取 30 m 粒度和 1500 m 幅度计算景观指数。

1.2.3 数据分析

本文通过 SPSS 19.0 软件对景观格局指数进行 Spearman 秩相关, 筛选出相互独立、不存在显著相关关系的格局指标 ($P > 0.05$), 主要指标有: 景观水平下的斑块密度 (PD)、边缘密度 (ED)、形状指数 (LSI)、蔓延度指数 (CONTAG) 以及香依多样性指数 (SHDI), 类型水平下选取耕地、林地、园地、草地及建设用地类型的斑块密度 (PD)、边缘密度 (ED)、形状指数 (LSI)、并列与散布指数 (IJI)、以及聚集度指数 (AI), 使用景观格局指数分析软件 (Fragstats v 4.2.1) 计算^[29-33]。以 1500 m 矩形半径为移动窗口半径, 分别计算景观水平和类型水平景观指数。

使用 SPSS 19.0 软件对主河道流域土地利用类型面积比及景观格局指数与面源污染物浓度数据在年平水期和丰水期进行 Spearman 相关分析相关性。线性排序图 (PCA) 是“物种”或“样方”通过中心化和标准化后的物种或样方相关矩阵, 能够反映物种或样方的积聚特征, 对应典范分析的单峰排序图 (CCA) 可以直观地反映物种随环境梯度的变化, 而灰色关联分析能够度量两种系统或变量的关联性大小。因此, 采用 Canoco 5.0 软件分别对小流域格局及面源污染分布特征进行 PCA 排序, 对水质及与景观格局指数的关系进行 CCA 分析, 同时利用 DPS 7.05 软件的灰色系统模块的关联度分析对水质变化显著的景观格局指数进行影响排序。

2 结果分析

2.1 流域景观格局及面源污染的分布特征

2.1.1 栖霞市流域景观格局空间分布特征

小流域尺度景观水平下根据 PCA 分析 (图 4a), 不同小流域景观格局空间分异较

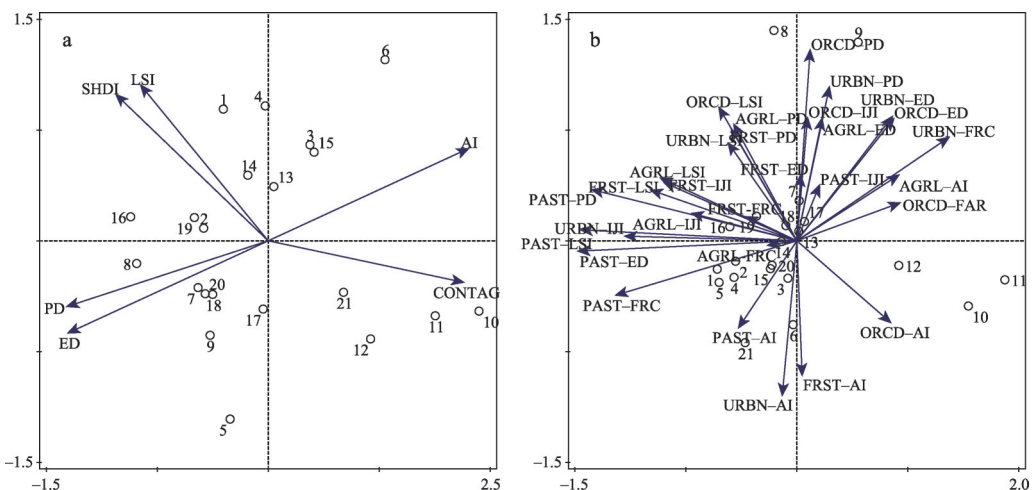


图 4 小流域尺度景观及类型水平下景观指数 PCA 排序

Fig. 4 The PCA ranking of landscape index at landscape and type levels on small watershed scale

大。3号、6号、13号、15号流域AI指数较高，1号、2号、4号、14号、16号、19号流域LSI指数和SHDI指数较高，主要为，5号、7号、8号、9号、17号、18号流域PD和ED指数较高，10号、11号、12号、21号流域CONTAG指数较高。

对栖霞市小流域尺度类型水平下PCA景观指数排序分析(图4b、表1)，可以看出，10号、11号、12号、13号小流域，位于观里镇漩河出水口附近及杨础镇杨础河全流域，园地、建设用地分维度指数，耕地聚集度指数，园地边缘密度指数较高。6号、14号、15号、20号、21号小流域，位于苏家店镇黄水河流域、蛇泊窝镇清水河流域以及桃村镇清阳河流域东北部，林地、园地、建设用地聚集度指数，林地边缘密度指数较高。1号、4号、5号、16号、19号小流域，位于庄园街道、翠屏街道、庙后镇、唐家泊镇等的城乡结合区域，草地形状指数、密度、边缘密度、分维度指数，耕地、建设用地散布和并列指数、林地形状指数值较高。2号、3号、7号、8号、9号、17号、18号小流域，位于松山街道、翠屏街道、寺口镇、桃村镇等城镇聚集区域，耕地形状指数、密度、边缘密度，建设用地形状指数、密度，边缘密度值较高。

表1 栖霞市不同小流域所属河岸带及土地利用类型

Table 1 The main river channels and land use type of different small watersheds in Qixia city

河岸带	小流域编号	主要土地利用类型及面积比例/%
白洋河	1、2、3、4、5	耕地：37.3、林地：24.1、建设用地：20.8
黄水河	6	林地：37.2、耕地：26.3、园地：13.9
漩河	7、8、9、10、11	耕地：35.7、林地：27.9、园地：19.2
杨础河	12、13	耕地：43.2、园地：18.3、林地：10.0
清水河	14、15、16、17	园地：38.0、耕地：25.8
清阳河	18、19、20、21	林地：30.9、耕地：28.6、建设用地：23.3

2.1.2 栖霞市流域面源污染空间分布特征

根据非约束排序的PCA分析结果，平水期面源污染过程指标在不同的流域监测断面内分布不均(图5a)，COD及EC较高的为6号、7号、13号、14号、20号小流域，主要分布区域为栖霞境内黄水河、漩河、杨础河及清杨河主河道断面。TN和NH₄⁺-N均较高

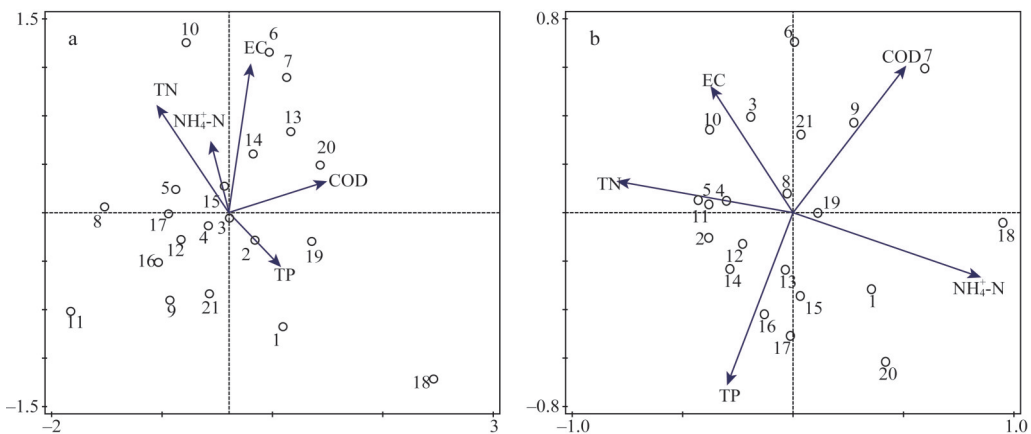


图5 小流域尺度基于PCA的栖霞市内平水期和丰水期流域面源污染过程排序

Fig. 5 The PCA ranking of NPSP during normal and wet periods on small watershed scale in Qixia city

的主要为5号、10号流域，位于白洋河和漩河主河道边缘位置。TP量较高的主要为1号、2号、18号、19号流域，位于白洋河、清阳河主要河道断面。其余小流域为于各断面污染物含量较为均一。丰水期较平水期小流域内监测断面各污染物指标都有较大不同(图5b)，COD较高的主要为7号、9号、21号流域，位于漩河及清阳河流域出口。EC及TN较高的主要为4号、5号、6号、10号流域，位于白洋河及漩河流域入口。TP较高的主要为2号、13号、14号、16号、17号流域，位于白洋河、杨础河、清水河主河道中部流域。NH₄⁺-N较高的主要为1号、15号、18号、20号流域，位于白洋河、清水河、清阳河流域城镇聚集区域。各监测断面除NH₄⁺-N和EC外其余污染物含量丰水期均较平水期少，这说明降水引起的地表径流和土壤侵蚀对面源污染起到一定贡献作用。白洋河流域上游监测断面TN和NH₄⁺-N浓度均较其他流域多，考虑该区域耕地和建设用地聚集，农田施肥是水质氮素富营养化的主要原因。位于黄水河、漩河、杨础河流域的6号、7号、13号、18号小流域监测断面COD、EC在丰平两期均较其他区域较高，周围园地面积比例较高，考虑有机肥施用有关。

2.2 流域尺度景观格局与水质关联关系

2.2.1 河岸带景观指数/土地利用类型与面源污染相关性

经栖霞市河岸带尺度景观水平下景观格局/土地利用类型与面源污染指标的Spearman相关性分析表(表2)，平水期内河岸带监测断面TN、EC与景观格局和土地利用类型关系密切，其余水质指标对变化响应不明显。其中平水期内TN与CONTAG呈显著正相关，与PD、SHDI、FRST显著负相关($P<0.05$)，经灰色关联分析，灰色关联系数分别为：0.4317、0.3213、0.3188、0.3151，其影响程度排序为：PD>CONTAG>SHDI>FRST。EC与PD、ED($P<0.05$)、FRST($P<0.01$)呈显著负相关，灰色关联系数分别为：0.3181、0.3521、0.4282，其影响程度排序为：FRST>ED>PD。丰水期内TN与CONTAG、SHDI显著相关($P<0.05$)，灰色关联系数分别为0.1525、0.1849，SHDI影响大于CONTAG。EC与PD($P<0.05$)、ED、AI、FRST($P<0.01$)显著相关，灰色关联系数分

表2 栖霞市平水期和丰水期河岸带景观指数/土地利用类型与面源污染相关性

Table 2 The correlation between landscape pattern/land use type and NPSP in main river basins in Qixia city during normal and wet periods

相关性	平水期					丰水期				
	TN	TP	COD	NH ₄ ⁺ -N	EC	TN	TP	COD	NH ₄ ⁺ -N	EC
PD	-0.400*	0.293	-0.349	-0.053	-0.878*	0.247	0.213	-0.536	0.254	-0.869*
ED	-0.444	0.304	-0.252	-0.144	-0.909*	0.129	0.356	-0.596	0.417	-0.928**
LSI	-0.187	-0.02	-0.686	-0.376	-0.753	0.637	-0.228	-0.661	-0.17	-0.692
CONTAG	0.634*	-0.364	-0.081	0.662	0.765	0.478*	-0.596	0.64	-0.505	0.755
SHDI	-0.394*	0.166	0.318	-0.711	-0.209	-0.35*	0.481	-0.335	0.352	-0.203
AI	0.431	-0.292	0.259	0.124	0.909	-0.138	-0.351	0.6	-0.404	0.929**
AGRL	0.475	-0.201	-0.149	0.734*	0.506	0.217	-0.511	0.551	-0.423	0.507
FRST	-0.532*	0.356	-0.167	-0.126	-0.967**	0.088	0.462	-0.672	0.295	-0.948**
ORCD	0.279	-0.393	-0.118	0.407	-0.408	0.104	0.291	-0.597	0.154	-0.547
URBN	-0.473	0.613	0.004	-0.387	0.049	-0.101	-0.159	0.51	0.238	0.144
PAST	-0.19	0.139	0.287	-0.579	0.389	-0.233	-0.034	0.256	-0.133	0.486

注：*、**分别表示在0.05、0.01水平(双侧)上显著相关。

别为：0.3195、0.3653、0.5977、0.4382，其影响程度排序为：AI>FRST>ED>PD。

2.2.2 小流域尺度景观及类型水平下格局与面源污染相关性

在平水期内栖霞小流域尺度下，分析景观水平下景观指数与面源污染的CCA的相关性（图6），可以看出，景观水平格局在第一主轴可以解释面源污染过程的19.45%，特征值为0.0014，累积解释变量为73.06%。前三个排序轴累积解释变量到达了99.50%，基本反映了小流域景观格局与面源污染过程关系绝大部分信息。第一排序轴、第二排序轴及第三排序轴小流域单元景观格局与面源污染过程的特征相关系数分别为0.5318、0.5890和0.4636（ $P<0.01$ ），两者关系密切。

景观格局与面源污染排序表明，景观水平下PD、SHDI以及CONTAG与面源污染的相关性最强，各面源污染物与景观格局指数的响应不同。其中，TN和CONTAG呈显著正相关，和PD、SHDI呈显著负相关。灰色关联系数分别为0.4270、0.3056、0.4571，其影响排序为：CONTAG>SHDI>PD。其余水质指标除COD与SHDI呈显著正相关外，均受景观格局影响不大。类型水平下，经Spearman相关性分析及灰色关联分析显示：平水期内TN与耕地斑块密度（AGRL-PD）呈显著正相关，与耕地形状指数（AGRL-LSI）、林地斑块密度（FRST-PD）呈显著负相关，其灰色关联系数分别为：0.3306、0.3095、0.3842，影响程度排序为：FRST-PD>AGRL-PD>AGRL-LSI。TP只与耕地散布与并列指数呈显著负相关，其余水质指标对景观指数变化响应不明显。

丰水期内栖霞小流域尺度下景观水平格局（图7）在第一主轴可以解释面源污染过程的19.37%，特征值为0.0009，累积解释变量为54.64%。前三个排序轴累积解释变量达到97.35%，基本反映了小流域景观格局与面源污染过程关系绝大部分信息。第一排序轴、第二排序轴及第三排序轴小流域单元景观格局与面源污染过程的特征相关系数分别为0.6460、0.5729和0.4636（ $P<0.01$ ）（图7）。

年丰水期内TN与景观水平下SHDI呈显著负相关，与CONTAG呈显著正相关。灰色关联系数为：0.3867、0.4009，CONTAG的影响大于SHDI。其余水质指标除EC与CONTAG呈显著正相关外，均对景观格局变化响应不明显。类型水平下，Spearman相关性分析及灰色关联分析显示：TN只与林地散布与并列指数呈显著负相关；TP与林地平均分维数（FRST-FRACMN）呈显著正相关，与建设用地形状指数（URBN-LSI）呈显著负相

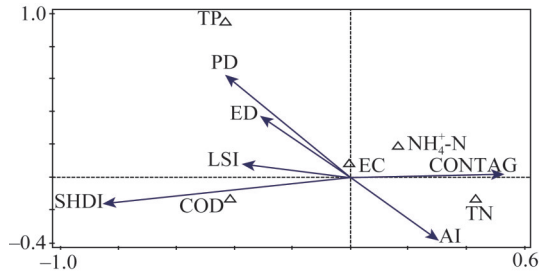


图6 平水期小流域尺度景观水平下景观指数与面源污染的CCA排序

Fig. 6 The CCA between landscape index and NPSP on small watershed scale during normal period

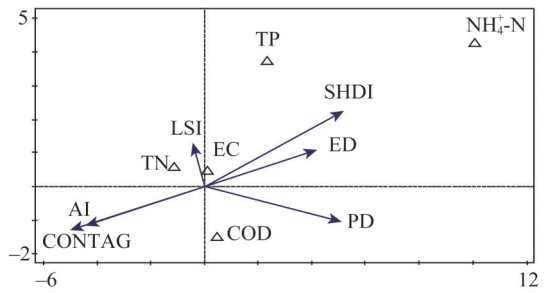


图7 丰水期小流域尺度景观水平下景观指数与面源污染的CCA排序

Fig. 7 The CCA between landscape index and NPSP on small watershed scale during wet period

关, 其灰色关联系数分别为: 0.4013、0.3063, FRST-FRACMN的影响大于URBN-LSI; COD只与建设用地斑块边缘密度(URBN-ED)呈显著正相关; EC与建设用地散布与并列指数(URBN-IJI)呈显著负相关, 与草地聚集性指数(PAST-AI)呈显著正相关, 其灰色关联系数分别为0.3615、0.4049, PAST-AI的影响大于URBN-IJI; NH_4^+-N 对类型水平景观格局变化响应不明显。

3 结论与讨论

3.1 结论

基于实地监测和3S技术, 对不同流域尺度、斑块和类型尺度、特征尺度下栖霞市景观格局/土地利用类型与面源污染物浓度的Spearman相关、灰色关联分析、非约束性PCA以及CCA分析, 得到栖霞市景观格局空间分异规律及与面源污染的相关性。

(1) 栖霞市面源污染主要为氮素的富集, 主要集中在各主河道的入口处, 其中以白洋河最为突出。基于CCA方法显示: 土地利用/景观格局能够揭示研究区面源污染扩散的绝大部分信息。而通过不同时期的水质监测表明, 降水是影响区域水质污染物浓度的一个重要因素。不同尺度的选择, 能够有效的阐述景观格局异质性在空间交错下如何影响面源污染。

(2) 栖霞境内不同流域的面源污染在平水期和丰水期分布各异。根据丰平期土地利用类型分布与监测断面水质相关性分析: 降水引起的地表径流和土壤侵蚀对面源污染起到一定贡献作用, 农田施肥是水质氮素富营养化的主要原因, 建设用地聚集, 城镇工业、生活用水是河道总磷污染的来源之一。同时, 园地比例较高的监测断面流域, COD、EC在丰平两期均较其他区域较高考虑有机肥施用有关。因此, 有效控制各类土地利用方式可以从根本上解决面源污染。

(3) 研究区TN和EC两项指标受景观格局影响最敏感, 不同时空尺度下影响因素不同。平水期河岸带尺度景观水平下TN主要受斑块密度影响, EC主要受斑块边缘密度的影响, 小流域尺度TN则主要受斑块蔓延度的影响, EC受景观格局影响不明显; 丰水期TN的主要影响因素为景观多样性, EC的主要影响因素为斑块聚合度, 小流域尺度影响TN主要景观指数与平水期一致, EC则与斑块蔓延度密切相关。小流域景观类型水平下, 平水期水质主要受林地密度及耕地聚集性影响, 丰水期则与林地形状、聚集性及草地的聚集性关系密切。

3.2 讨论

综合来看, 研究区面源污染在丰平期不同空间尺度下扩散主控因素不同。丰水期降水较多, 地表径流和土壤侵蚀在不同土地利用类型、坡度的缓冲下, 尺度越小, 景观格局作用越明显。而平水期面源污染的扩散在河岸带尺度一般受上游景观格局的影响, 而小尺度与周围景观格局有一定关系, 总体景观格局成为主要影响因素。受监测数据影响, 本文只考虑了年内丰平期景观格局与面源污染的相关性, 而今后考虑长时间序列景观格局变化所导致的面源污染扩散及累积过程是主要的研究方向。

参考文献(References):

- [1] 杨昆, 杨林, 许泉立, 等. 流域非点源污染模拟及空间决策支持信息系统. 北京: 科学出版社, 2015: 1-6. [YANG K,

- YANG L, XU Q L, et al. Watershed Non-Point Source Pollution Simulation and Spatial Decision Support Information System. Beijing: Science Press, 2015: 1-6.]
- [2] 于飞, 施卫明. 近10年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析. 土壤学报, 2015, 52(6): 1311-1324. [YU F, SHI W M. Nitrogen use efficiencies of major grain crops in China in recent 10 years. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(6): 1311-1324.]
- [3] 杨建辉. 农业化学投入与农业经济增长脱钩关系研究: 基于华东6省1市数据. 自然资源学报, 2017, 32(9): 1517-1527. [YANG J H. Research on decoupling relationship between agricultural chemical inputs and agricultural economic growth: Based on the data of six provinces and one city in East China. *Journal of Natural Recourse*, 2017, 32(9): 1517-1527.]
- [4] 马国霞, 於方, 齐霁, 等. 基于绿色投入产出表的环境污染治理成本及影响模拟. 地理研究, 2014, 33(12): 2335-2344. [MA G X, YU F, QI J, et al. Simulation of pollutant control cost and its economic impact based on China's green input-output table. *Geographical Research*, 2014, 33(12): 2335-2344.]
- [5] 杨林章, 吴永红. 农业面源污染防控与水环境保护. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 168-176. [YANG L Z, WU Y H. Prevention and control of agricultural non-point source pollution and aquatic environmental protection. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(2): 168-176.]
- [6] 欧阳威, 刘迎春, 冷思文, 等. 近三十年非点源污染研究发展趋势分析. 农业环境科学学报, 2018, 37(10): 2234-2241. [OUYANG W, LIU Y C, LENG S W, et al. An analysis of research trends about non-point source pollution over the last three decades. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(10): 2234-2241.]
- [7] 傅伯杰. 地理学综合研究的途径与方法: 格局与过程耦合. 地理学报, 2014, 69(8): 1052-1059. [FU B J. The integrated studies of geography: Coupling of patterns and processes. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(8): 1052-1059.]
- [8] 傅伯杰. 我国生态系统研究的优先领域. 地理教育, 2016, (4): 1. [FU B J. Priority areas for ecosystem research in China. *Geographical Education*, 2016, (4): 1.]
- [9] 傅伯杰. 新时代自然地理学发展的思考. 地理科学进展, 2018, 37(1): 1-7. [FU B J. Thoughts on the recent development of physical geography. *Advances in Earth Science*, 2018, 37(1): 1-7.]
- [10] 陈利顶, 李秀珍, 傅伯杰, 等. 中国景观生态学发展历程与未来研究重点. 生态学报, 2014, 34(12): 3129-3141. [CHEN L D, LI X Z, FU B J, et al. Development history and future research priorities of landscape ecology in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(12): 3129-3141.]
- [11] 刘焱序, 杨思琪, 赵文武, 等. 变化背景下的当代中国自然地理学: 2017全国自然地理学大会述评. 地理科学进展, 2018, 37(1): 163-171. [LIU Y X, YANG S Q, ZHAO W W, et al. Contemporary Chinese physical geography in the context of change: Review of the 2017 national physical geography conference. *Progress in Geography*, 2018, 37(1): 163-171.]
- [12] MATJA Z G, MARINA P, MARTIN V. Land use change in a 200-year period and its effect on blue and green water flow in two Slovenian Mediterranean catchments-lessons for the future. *Hydrol Process*, 2013, (30): 3964-3980.
- [13] MORIKEN C, NOR R J, AHMAD F B A. Impact of land uses on water quality in Malaysia: A review. *Ecological Processes*, 2019, 8: 10.
- [14] BIZUNEH W, ARGAW A, SEID T M, et al. Effect of watershed land use on tributaries' water quality in the East African Highland. *Environ Monit Assess*, 2019, 191: 36.
- [15] 刘珍环, 李正国, 杨鹏, 等. 城市景观组分影响水质退化的阈值研究. 生态学报, 2013, 33(2): 586-594. [LIU Z H, LI Z G, YANG P, et al. The degradation threshold of water quality associated with urban landscape component. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(2): 586-594.]
- [16] 岳隽, 王仰麟, 李贵才, 等. 不同尺度景观空间异质特征对水体质量的影响: 以深圳市西丽水库流域为例. 生态学报, 2007, 27(12): 5271-5281. [YUE J, WANG Y L, LI G C, et al. The influence of landscape spatial difference on water quality at differing scales: A case study of Xili reservoir water shed in Shenzhen city. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12): 5271-5281.]
- [17] 王小平, 张飞, 李晓航, 等. 艾比湖区域景观格局空间特征与地表水质的关联分析. 生态学报, 2017, 37(22): 7438-7452. [WANG X P, ZHANG F, LI X H, et al. Correlation analysis between the spatial characteristics of land use/cover-landscape pattern and surface-water quality in the Ebinur Lake Area. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(22): 7438-7452.]

- [18] 夏品华, 孔祥量, 喻理飞. 草海湿地小流域土地利用与景观格局对氮、磷输出的影响. 环境科学学报, 2016, 36(8): 2983-2989. [XIA P H, KONG X L, YU L F. Effects of land-use and landscape pattern on nitrogen and phosphorus exports in Caohai wetland watershed. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(8): 2983-2989.]
- [19] 刘怡娜, 孔令桥, 肖焱, 等. 长江流域景观格局与生态系统水质净化服务的关系. 生态学报, 2019, 39(3): 844-852. [LIU Y N, KONG L Q, XIAO Y, et al. Relationships between landscape pattern and ecosystem water purification service in the Yangtze River Basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(3): 844-852.]
- [20] 孔佩儒, 陈利顶, 孙然好, 等. 海河流域面源污染风险格局识别与模拟优化. 生态学报, 2018, 38(12): 4445-4453. [KONG P R, CHEN L D, SUN R H, et al. Identification and optimized simulation of non-point source pollution risk patterns in the Haihe River Basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(12): 4445-4453.]
- [21] 吴昊. 秦岭山地松栎混交林土壤养分空间变异及其与地形因子的关系. 自然资源学报, 2015, 30(5): 858-869. [WU H. The relationship between terrain factors and spatial variability of soil nutrients for Pine-Oak Mixed Forest in Qinling Mountains. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(5): 858-869.]
- [22] 解雪峰, 濮励杰, 朱明, 等. 基于典范对应分析的滨海滩涂围垦区景观格局与土壤盐渍化关系. 地理研究, 2017, 36(3): 495-505. [XIE X F, PU L J, ZHU M, et al. Relationship between landscape patterns and soil salinity based on canonical correspondence analysis coastal reclamation area. *Geographical Research*, 2017, 36(3): 495-505.]
- [23] MAHESH S, ROY R, GUA B. Modeling the effects of riparian buffer zone and contour strips on stream water quality. *Ecological Engineering*, 2009, 35: 1167-1177.
- [24] MIAE H, ZHONG L, ZHANG B, et al. Biomass production in the Lower Mississippi River Basin: Mitigating associated nutrient and sediment discharge to the Gulf of Mexico. *Science of the Total Environment*, 2018, 635: 1585-1599.
- [25] 赵琰鑫, 彭虹, 王双玲, 等. 分布式工业区面源污染模型研究. 武汉大学学报: 工学版, 2012, 45(5): 594-597. [ZHAO Y X, PENG H, WANG S L, et al. Study on nonpoint source pollution model in distributed industrial zones. *Journal of Wuhan University: Engineering*, 2012, 45(5): 594-597.]
- [26] 张广纳, 邵景安, 王金亮, 等. 三峡库区重庆段农村面源污染时空格局演变特征. 自然资源学报, 2015, 30(7): 1197-1209. [ZHANG G N, SHAO J A, WANG J L, et al. Spatial and temporal variations of agricultural non-point source pollution in the Three Gorges Reservoir Area of Chongqing. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(7): 1197-1209.]
- [27] 荆延德, 张华美. 基于 LUCC 的南四湖流域面源污染输出风险评估. 自然资源学报, 2019, 34(1): 128-139. [JING Y D, ZHANG H M. Risk assessment of non-point source pollution output in Nansihu Lake Basin based on LUCC. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(1): 128-139.]
- [28] 栖霞市统计局. 栖霞市统计年鉴. 2015: 140-141. [Bureau of Statistics of Qixia City. *Statistical Yearbook of Qixia*. 2015: 140-141.]
- [29] 熊兴, 江源, 任斐鹏, 等. 东江下游河网区土地利用变化及其对水体的生态影响. 自然资源学报, 2010, 25(8): 1320-1331. [XIONG X, JIANG Y, REN F P, et al. Land-use change and its ecological effect to the water in downstream river network area of Dongjiang Basin. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(8): 1320-1331.]
- [30] 李明涛, 王晓燕, 刘文竹. 潮河流域景观格局与非点源污染负荷关系研究. 环境科学学报, 2013, 33(8): 2296-2306. [LI M T, WANG X Y, LIU W Z. Relationship between landscape pattern and non-point source pollution loads in the Chaohu River Watershed. *Journal of Environmental Science*, 2013, 33(8): 2296-2306.]
- [31] 蔡宏, 林国敏, 康文华. 赤水河流域中上游坡地景观特征对河流水质的影响. 地理研究, 2018, 37(4): 704-716. [CAI H, LIN G M, KANG W H. The effects of sloping landscape features on water quality in the upper and middle reaches of the Chishui River Watershed. *Geographical Research*, 2018, 37(4): 704-716.]
- [32] 焦胜, 杨娜, 彭楷, 等. 汾水流域土地景观格局对河流水质的影响. 地理研究, 2014, 33(12): 2263-2274. [JIAO S, YANG N, PENG K, et al. The effects of land-use and landscape pattern on water quality in Weihe river watershed. *Geographical Research*, 2014, 33(12): 2263-2274.]

Relationship of landscape pattern and non-point source pollution in mountainous area of Eastern Shandong province

WANG Meng-wen¹, QI Wei¹, WANG Peng-tao², WANG Zhuo-ran¹

(1. College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Taian 271018, Shandong, China;

2. School of Tourism & Research Institute of Human Geography, Xi'an International Studies University, Xi'an 710128, China)

Abstract: Based on field monitoring and 3S technology, Qixia city in the low hilly area of Eastern Shandong province was taken as the research area. Pearson correlation, unconstrained PCA and corresponding canonical analysis (CCA) were used to study the coupling between landscape pattern and non-point source pollution at different watershed scales. The results show that: (1) The spatial variation of landscape pattern is obvious; the patches of agricultural land and construction land are relatively fragmented at the characteristic scale; and the patches of other types of land are highly aggregated. (2) The river surface source pollutants in the study area are mainly TN-based, and the main river outlet is the more polluted area. (3) The influence of landscape pattern on water quality during the wet period is greater than that of the normal water period, and TN and EC are most sensitive to the change of land use type area ratio and landscape pattern index. At different scales, water quality affected by landscape pattern and land use type is different. (4) In normal period at riverside scale, landscape that has the greatest impact on TN is the patch density, and EC is most affected by landscape edge density. At small basin scale TN is greatly affected by landscape spread, and COD is closely related to landscape diversity. The diversity of landscape on the scale of the riverbank during the wet period has the greatest influence on TN, the EC is greatly affected by the polymerization of the plaques, and the biggest factors affecting TN on the small basin scale are consistent with the flat water period, and EC is closely related to landscape spread. (5) At small basin landscape, TN is mainly affected by the density of forest land patch, TP and cultivated land dispersion are closely related to the parallel index, the abundance of water TN is significantly influenced by the forest land dispersion and juxtaposition index, TP is sensitive to the change of the average dimensionality of forest land, and EC is most influenced by grassland aggregation. Basically, the study clarified the spatial distribution characteristics of landscape pattern and non-point source pollution in the study area, and discussed the correlation between them at different scales, which provided a scientific basis for sustainable utilization of water and land resources in Qixia city.

Keywords: Eastern Shandong mountainous area; landscape pattern; non-point source pollution; correlation