



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

平原河网区排水沟塘水质动态与景观特征的关系

贾忠华, 尹玺, 罗纨, 邹家荣, 陈诚

引用本文:

贾忠华, 尹玺, 罗纨, 等. 平原河网区排水沟塘水质动态与景观特征的关系[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(4): 665–676.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0416>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

1984—2015年黄河三角洲人工湿地的演变及主要驱动因子

任玲玲, 栗云召, 于淼, 杨继松, 战超, 周迪

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 493–502 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0111>

河北省典型样带土壤类型空间格局特征

李瑾璞, 石垚, 袁大鹏, 陈奇乐, 王树涛

农业资源与环境学报. 2020, 37(5): 681–688 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0268>

太湖地区河蟹"养殖-净化"复合系统氮磷循环模拟模型研究

朱冰莹, 董佳, 陆长婴, 施林林, 沈明星, 杨海水

农业资源与环境学报. 2017, 34(2): 134–144 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0252>

基于CA-Markov模型和MCE约束的白洋淀流域景观动态研究

张晨星, 徐晶晶, 温静, 杨新兵, 王佳欢, 赵波

农业资源与环境学报. 2021, 38(4): 655–664 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0415>

基于移动窗口法的半干旱生态脆弱区景观破碎化及驱动力分析

胡荣明, 杜嵩, 李朋飞, 姚燕子, 王睿哲, 滕坤阳

农业资源与环境学报. 2021, 38(3): 502–511 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0490>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

贾忠华, 尹玺, 罗纨, 等. 平原河网区排水沟塘水质动态与景观特征的关系[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(4): 665–676.

JIA Zhong-hua, YIN Xi, LUO Wan, et al. Relating landscape characteristics to water quality dynamics in the ditches and ponds of the plain river network area in the lower reaches of the Yangtze River basin, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(4):665–676.



开放科学 OSID

平原河网区排水沟塘水质动态与景观特征的关系

贾忠华, 尹玺, 罗纨, 邹家荣, 陈诚

(扬州大学水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009)

摘要:为了探讨沟塘水质与景观特征之间的关系,以长江下游平原典型沟塘系统为研究对象,首先根据总氮(TN)、总磷(TP)、铵氮(NH_4^+-N)、硝氮(NO_3^--N)浓度分析水质时空变化,再用景观指数法和土地利用动态模型分析沟塘景观特征变化,然后用Pearson相关性分析以及冗余分析对二者的关系进行研究。结果表明:不同季节的沟塘水质对景观特征有不同的响应,景观特征对干季的水质变化解释度能够达到47.3%,相对于湿季水质有较强相关性。沟塘景观结构能够解释15.7%~47.3%的水质变化,沟塘边缘密度在不同时段均对水质有重要影响,与污染物浓度呈显著负相关;景观组成中沟塘对水质作用相对较弱,但在景观结构中沟塘类型景观指数相较于其他斑块类型景观指数作用较强。研究表明,沟塘的形态结构特征对不同时段水质有重要影响,聚集的沟塘斑块以及复杂的边界条件对水质有利,沟塘景观特征与干季水质相关性较好。

关键词:平原河网地区;沟塘系统;水质;景观指数;景观结构

中图分类号:X52;P901 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2021)04-0665-12 doi: 10.13254/j.jare.2020.0416

Relating landscape characteristics to water quality dynamics in the ditches and ponds of the plain river network area in the lower reaches of the Yangtze River basin, China

JIA Zhong-hua, YIN Xi, LUO Wan, ZOU Jia-rong, CHEN Cheng

(College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: In order to explore the relationship between water quality and landscape characteristics, a typical ditch-pond system in the lower Yangtze River Plain was chosen as the study area. First, this study analyzed the temporal and spatial changes of water quality indicators such as total nitrogen, total phosphorus, ammonium nitrogen and nitrate nitrogen. Combining the landscape index method and the land use dynamic model to analyze the change of the landscape characteristics of the pond. Finally, Pearson correlation analysis and redundancy analysis were used to study the relationship between them. The results showed that the water quality of different seasons had different responses to the landscape characteristics, and the explanation rate of the landscape characteristics to the water quality changes in the dry season could reach 47.3%, which had a stronger relationship with the water quality than in wet season. The landscape structure of ditches and ponds could explain 15.7%~47.3% of the water quality changes. The edge density index of ditches and ponds had an important impact on water quality in different periods, and had a significant negative correlation with pollutant concentration; In landscape composition, the effect of ditches and ponds on water quality was relatively weak, but in landscape structure, the effect of ditches and ponds type landscape index was stronger than that of other patch types. The results show that the morphological and structural characteristics of ditches and ponds had an important impact on water quality in different periods, the aggregated patches and complex boundary conditions of ditches and ponds were conducive to water quality, and the landscape characteristics of ditches and ponds had a good connection with water quality in dry season.

Keywords: plain river network area; ditch-pond system; water quality; landscape metrics; landscape structure

收稿日期:2020-08-07 录用日期:2020-10-12

作者简介:贾忠华(1967—),男,新疆塔城人,博士,教授,主要从事水资源与农业环境保护研究。E-mail:jjazh@yzu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(51979239);江苏省水利科技项目(2019040,2018052)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(51979239); Water Conservancy Science and Technology Project of Jiangsu Province (2019040,2018052)

作为农业区景观中的重要组成部分,沟塘系统不仅为农田排、灌提供了便利,还为农业非点源污染物的降解提供了条件^[1-2]。在集约农业的背景下,沟塘系统受人为干扰越来越严重,其数量、形态、结构等均发生不同程度的变化^[3],明确这些变化对其水质净化功能的影响是沟塘系统保护工作的重要前提。目前,沟塘系统水质功能研究的一个重要方向是从景观生态学的角度解释水体污染物与景观特征之间的联系^[4-5],包括利用GIS(地理信息系统)技术及空间统计,推导、开发了众多压缩、抽象景观空间配置和结构的定量指数或指标^[6-7],描述的景观特征包括景观组成和景观结构^[8]。有大量研究通过景观指数法分析认为污染物浓度与景观特征具有较强的相关性^[9-11],表征流域景观特征的景观指数在不同尺度上能够解释32%~70%的水质变化^[12-14],李昆等^[15]的研究表明农业区景观特征在200 m尺度上对水质变化的解释能力最大,Shen等^[16]通过对景观结构和水质的结合分析认为,斑块水平上的景观指数对水质的预测效果更好。许多景观指数与水质结合的研究将沟塘水体当作承接景观结构变化的载体,而对沟塘斑块自身景观指数的变化关注不足。对沟塘自身变化的研究多集中在沟道功能类型以及不同区域之间沟塘数量分布的对比,例如,姜旭娟等^[17]以滩地和采砂坑证明不同河道类型对水质变化有显著影响;李玉凤等^[18]在农村小流域的研究证明水塘面积和密度对其污染物截留能力影响显著。

上述研究主要集中在整体景观空间格局与污染物分布的关系,对于不同分段沟塘之间的形态结构差异及污染物分布的季节性差异关注不足。因此有必要选择一个典型农业区域来研究沟塘景观特征对不同时段污染物浓度的影响。本研究以江苏省扬州市江都区沿运灌区为例,选择边界形状较为复杂的平原河网区沟塘系统^[19],采用景观指数法,结合沟塘分段、分时的水质监测结果,探讨了在不同沟道条件、不同季节下的景观特征以及沟塘结构与水质动态的关系,旨在为类似地区沟塘系统保护与利用提供理论依据与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与水质监测

研究区位于江苏省扬州市江都区京杭大运河东侧的沿运水稻灌区,属亚热带湿润气候区,年平均气温14.9℃,年降雨量约1 000 mm。区内地势平坦,河

湖交织,是长江下游较为典型的平原河网区。研究区面积146 hm²,主要分布三条沟道,长度分别为1 331、640 m和843 m,另有大小不一的水塘散落其中,形成复杂的沟塘系统。三条主要沟道为6~80 m水面宽度不等的天然土沟。土地利用类型主要包括沟塘、农田、村庄、道路等,其中农田占比为76%,沟塘占比为12%,沟塘与农田面积比为0.156。区内沟塘系统的主要功能是接纳和输出雨水径流和农田排水,主要污染物来源是部分农村生活污水和大量的农田排水。研究区内普遍实行稻麦轮作,水稻生长期为6月中旬至10月,小麦生长期为10月下旬至次年6月上旬。

由于研究区内小面积水塘较为分散,水质监测点的选择沿三条主要沟道均匀分布,有利于观察水质的连续性变化。所选19个水质监测点根据其所在沟道分为三组,如图1所示。水质监测选用总氮(TN)、总磷(TP)、硝氮(NO₃-N)、铵氮(NH₄⁺-N)四个水质参数,监测期为2018年1月—2018年12月,监测频率为每月一次。为了更好地了解污染物浓度的季节性变化,考虑降雨量和灌溉量的差别以及主要作物生长变化,将水质数据分为干湿两季进行分析,湿季选择灌溉量较高的7—8月,干季选择11—12月。水质分析采用19个监测点不同时段实测值,为更直观地体现水质污染的空间分布状况以及季节差异,用反距离加权插值法(IDW)生成污染物空间分布图。

1.2 沟塘景观格局分析

首先利用景观指数以及土地利用类型动态模型对沟道面积变化和形态结构进行分析,影像数据选用分辨率较高的2018年World Viewer系列数据(1.19 m分辨率,坐标系为WGS-1984-UTM-Zone-50N),利用ENVI(Vision 5.3.1)进行校正处理和监督分类,根据经验^[20]采用最大似然法识别土地利用分类并目视修改。对得到的土地利用分类图像选择混淆矩阵进行精度评价,选择地面参考点位137个,总体分类精度为93.6%,Kappa系数为0.89,满足研究需要。沿沟道设置19个200 m×200 m正方形点缓冲区,借助景观格局分析软件FragStats 4.2对每个缓冲区进行参数计算。由于一些景观指数是基于相同变量进行统计处理,各个指标之间存在一定信息冗余^[21]。为避免指数重复,参考已有研究^[16,22],选择常用景观指数(表1),具体计算和意义参考软件手册^[23]。景观特征的刻画包括景观组成和景观结构,沟塘景观特征和水质的关系采用Pearson相关性分析和冗余分析。Pearson相关性分析量化每个景观变量和水质变量之间的关系,

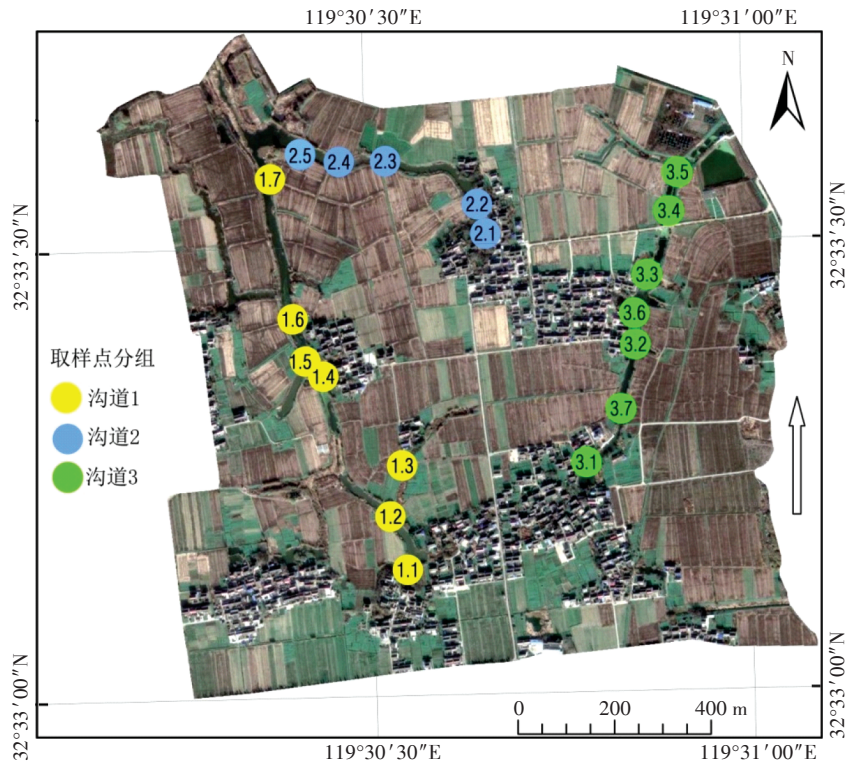


图1 研究区取样点分布图

Figure 1 Distribution of sampling points in the study area

表1 沟塘景观表征指标

Table 1 List of the selected landscape metrics

景观指数 Landscape metrics	描述 Description
斑块密度 Patch density (PD ^{ab})	单位面积(本研究为 1 km ²)上的斑块个数,表征景观破碎度
边缘密度 Edge density (ED ^{ab})	单位面积上景观类型的边缘总长度,表征其边界条件
景观形状指数 Landscape shape index (LSI ^{ab})	表征景观形状复杂程度
散布与并列指数 Interspersion and juxtaposition index (IJI ^{ab})	表征斑块间连接程度
平均回转半径 Mean radius of gyration (GYRATE-AM ^{ab})	相当于物理意义上的关联长度
景观类型比例 Percent of landscape (PLAND ^a)	斑块类型所占景观面积比例
最大斑块指数 Largest patch index (LPI ^a)	最大斑块所占景观面积比例,表征景观优势度
蔓延度 Contagion (CONTAG ^b)	表征斑块聚集程度
香农多样性指数 Shannon's diversity index (SHDI ^b)	表征景观类型多样性
香农均匀度指数 Shannon's evenness index (SHEI ^b)	表征景观均匀度和优势度

注:a、b代表计算水平:a为类型水平;b为景观水平。
Note:a,b represents the calculation level:a calculated at class level;b calculated at landscape level.

冗余分析能够从多个景观变量中筛选对水质变化影响最重要的变量。与 Pearson 相关性分析不同的是,冗余分析考虑了各解释变量协同作用的结果,而相关性分析则是解释变量之间独立作用的结果。

针对沟塘面积的变化,参考常用的基于时间变化的土地利用动态模型^[24-25],提出基于距离变化的沟道面积变量动态模型,以期对沟道面积变化做出较好的

解释,公式如下:

$$K = \frac{A_b - A_a}{A_a} \times \frac{1}{S_{ab}} \times 100\% \tag{1}$$

式中:A_a、A_b分别为两个临近缓冲区中处于相对上游和相对下游的沟道面积,m²;S_{ab}为缓冲区中心点之间的距离,m;K为随两点间汇入距离变化的面积变化率,%。对沿程多个点缓冲区进行统计,总体上可以

反映沿距离变化的沟塘面积变化情况。

对各缓冲区面积变化率进行统计,构建沿程面积累计变化率,公式如下:

$$T_k = \sum_{i=1}^{n-1} |K_{i,i+1}| \quad (2)$$

式中: $K_{i,i+1}$ 为各缓冲区沟道面积变化率,%; n 为缓冲区数量; T_k 为累计变化率,%。 T_k 能够反映整条沟道的变化幅度,值越大说明沟塘类型面积波动越大,数值越小说明景观类型越稳定。

2 结果与分析

2.1 污染物浓度及其空间变化

表2列出了三条沟道不同季节污染物的浓度变化,TP和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 年均浓度具有明显分组差异。TP、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的浓度值季节性差异显著,浓度变化最大的是 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度,从湿季 $3.07\sim 3.30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低到干季的 $1.25\sim 1.80\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;沟道2在不同季节的各项污染物浓度最低,季节性变化较大。

采用反距离加权插值法(IDW)绘制污染物浓度空间分布图(图2)。研究区内沟道上下游浓度变化较大,污染物浓度随着水流长度的增加呈现减少的趋势。从分布位置上看, $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 高浓度值主要集中在1、3号沟道,TN和TP高浓度值都出现在3号沟道,大部分污染物的高浓度值都聚集在中上游,污染物随着运移距离的增加,沟塘总体降解作用逐渐下降。

2.2 景观组成与水质

图3显示了19个缓冲区的土地利用组成。各类用地面积存在一定差异,但总体均以农田为主要土地利用类型,其次为沟塘,从上游到下游的水流过程中沟塘面积总体表现出上升的趋势。沟道2的沟塘面积平均占比最大(21.27%),沟道3的面积占比最小

(19.23%)。

图4显示了沟道面积变化率,随着缓冲区上游水量汇入距离的增加,沿程沟道面积变化率差异较大。各沟道从起点至终点面积变化率有较大波动,最终呈增长趋势,其中沟道2变化幅度最大,面积变化率在下游有剧烈增加。各沟道中部面积变化率有减小的趋势,可能是由于村庄面积的增加使得沟塘斑块减少。从累计变化率可以看出,沟道2面积变化最大,其次是沟道3,沟道1最为稳定。

沟道两侧景观组成和水质的Pearson相关性分析结果如表3所示,沟道两侧景观组成对水质有重要影响,沟塘面积与TN、TP和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度表现为显著负相关。道路和农田面积与各项污染物浓度呈正相关,村庄面积与污染物浓度相关性较弱,但总体上与TN、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度呈负相关,与TP浓度呈正相关。

对景观组成变量进一步分析,首先采用降趋势对应分析(DCA)得到梯度长度小于3,因此选择冗余分析法(RDA)进行分析,结果如表4所示。景观组成对干季水质解释度较好,沟塘面积能够解释12.2%的干季水质变化,道路和村庄面积对水质变化的解释度优于沟塘,分别为22.3%和14.5%,整体景观组成对水质的解释量达到49.0%。景观组成对湿季的水质变化解释度较差,未通过蒙特卡洛置换检验,排序结果不可靠。景观组成对干季水质的冗余分析结果见图5,各污染物浓度与道路和村庄面积呈正相关,与沟塘面积呈负相关。

2.3 景观结构与水质

景观指数计算结果见图6。其中沟塘边缘密度(ED)总体呈上升趋势,与污染物浓度上游高、下游低的趋势相反。沟塘斑块密度(PD)与边缘密度趋势相似,但沟塘斑块密度变化幅度较大,在下游有强烈增长,结合沟塘面积比例增幅较小的情况推断下游沟塘

表2 三条沟道内不同季节污染物统计($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

Table 2 Statistical results of pollutant concentrations in different seasons($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

编号 No.	TN		TP		$\text{NO}_3\text{-N}$			$\text{NH}_4\text{-N}$		
	年均 Average	年均 Average	湿季 Wet	干季 Dry	年均 Average	湿季 Wet	干季 Dry	年均 Average	湿季 Wet	干季 Dry
1	2.42±1.67a	0.16±0.15b	0.22±0.05Ab	0.09±0.05Ba	1.88±1.60a	3.30±1.26Aa	1.68±0.54Ba	0.27±0.38a	0.69±0.47Aa	0.29±0.49Ba
2	2.29±1.79a	0.14±0.13b	0.19±0.07Ab	0.09±0.05Ba	1.43±1.07b	3.07±0.71Aa	1.25±0.15Bb	0.23±0.30a	0.46±0.18Aa	0.14±0.17Ba
3	3.05±2.31a	0.23±0.17a	0.32±0.09Aa	0.13±0.10Ba	1.63±1.13ab	3.25±1.28Aa	1.80±0.56Ba	0.27±0.40a	0.57±0.40Aa	0.24±0.37Ba

注:参数统计值为平均值±标准差;同列不同小写字母表示沟道分组间污染物浓度差异显著($P<0.05$);同行不同大写字母表示相同沟道不同季节间污染物浓度差异显著($P<0.05$)。

Note: Water quality parametrics was mean±standard error. Different small letters in the same column indicated the significant difference of pollutants concentration in different ditch group($P<0.05$); Different capital letters in the same line indicate the significant difference of pollutants concentration in the same ditch in different seasons($P<0.05$).

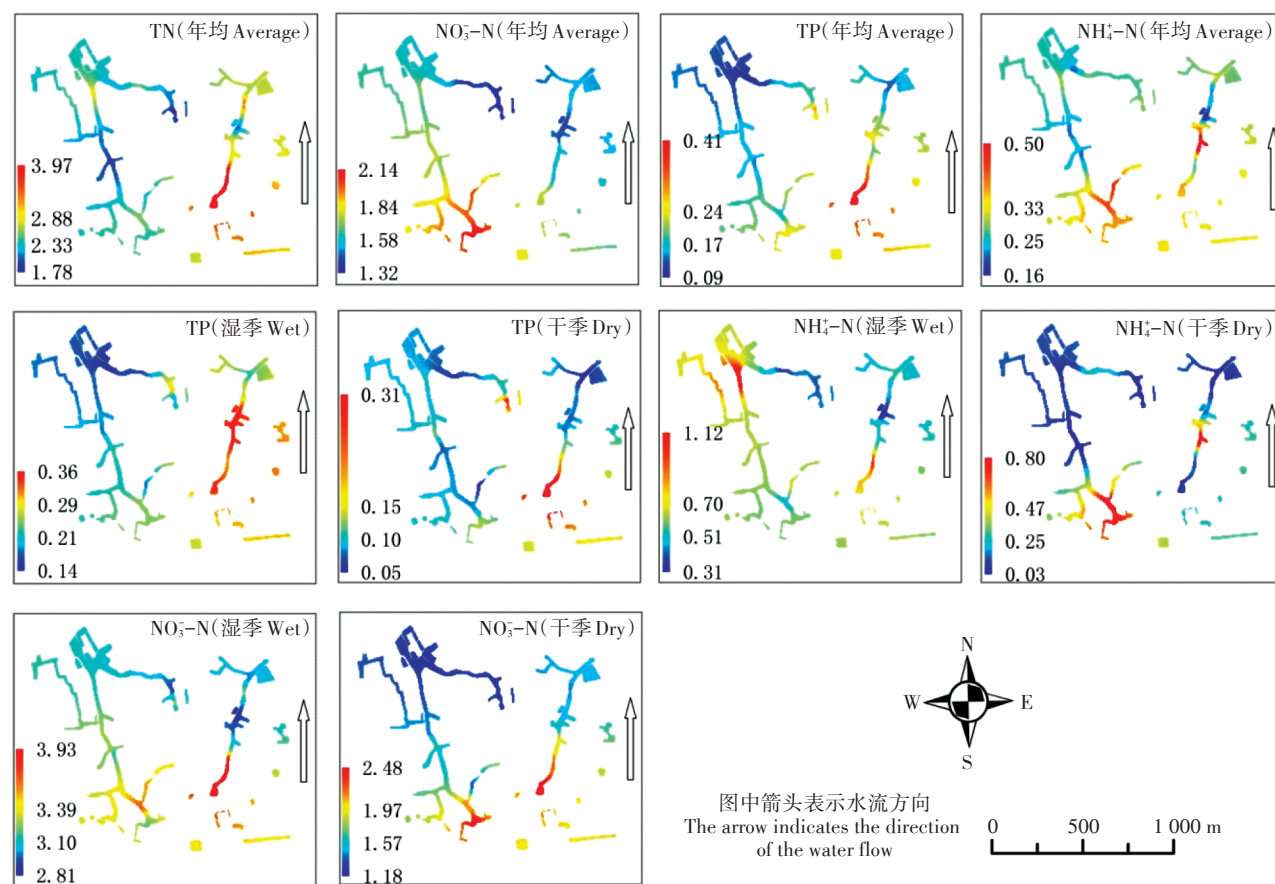
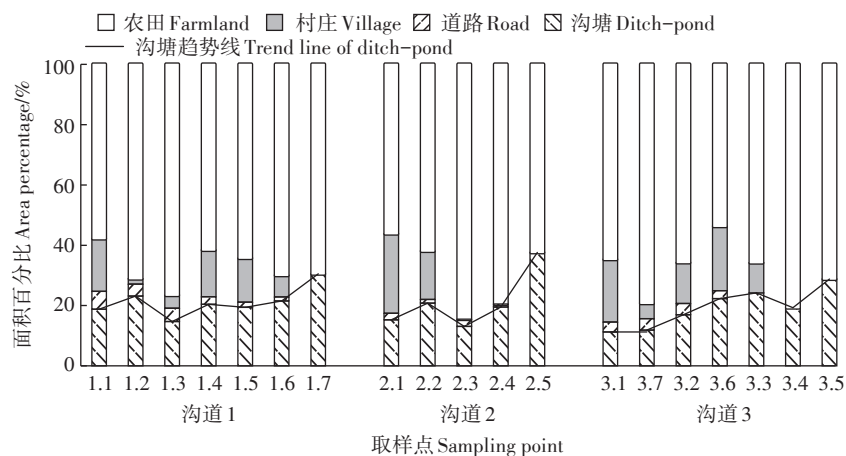
图2 污染物浓度空间分布插图(mg·L⁻¹)Figure 2 Pollutant concentration distribution map(mg·L⁻¹)

图3 取样点200 m缓冲区内土地利用统计

Figure 3 Land use statistics within 200 m buffer of sampling points

更加破碎化。散布与并列指数(IJI)能够反映斑块之间的邻接程度,数值越小离散程度越低。沟塘结构的分组结果(图6a)中,沟道2的ED略高于其他两组,其平均值为264 m·hm⁻²,大于沟道1、沟道3的251、237 m·hm⁻²;图6b和图6e中IJI和LSI变化趋势不明显,但从平均值结果来看,均为沟道2数值较大;图6c和图

6f中,沟道2的PD明显高于其他两组,但GYRATE-AM值较低。因此沟道2的分布形态最为复杂,表现在较高的景观形状指数和边缘密度,同时沟道2最为聚集,表现在较高的斑块密度、散布与并列指数和较低的平均回转半径。

景观指数与水质参数的Pearson相关性分析结果

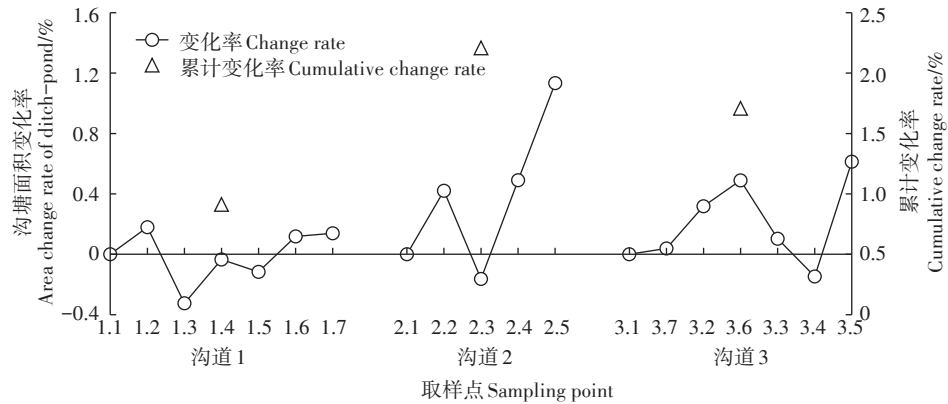


图4 沟塘面积变化率

Figure 4 Area change rate of ditch-pond

表3 景观组成与水质相关性分析(r)

Table 3 Pearson's correlation analysis of land use and water quality(r)

土地利用类型	TN		TP		NH ₄ -N			NO ₃ -N		
Land use type	年均 Average	年均 Average	湿季 Wet	干季 Dry	年均 Average	湿季 Wet	干季 Dry	年均 Average	湿季 Wet	干季 Dry
道路	0.55	0.45	0.40	0.24	0.64*	0.32	0.74**	0.55	0.39	0.82**
村庄	-0.19	0.28	0.10	0.25	-0.04	-0.17	-0.28	-0.40	-0.43	-0.32
沟塘	-0.62*	-0.77**	-0.33	-0.87**	-0.12	-0.55	0.22	0.09	-0.68*	-0.42
农田	0.40	-0.09	0.01	0.12	-0.13	0.54	-0.09	0.27	0.65*	0.39

注:*表示在0.05水平(双尾)相关性显著;**表示在0.01水平(双尾)相关性显著。

Note:* indicates the correlation is significant at 0.05 level(double tail);** indicates the correlation is significant at 0.01 level(double tail).

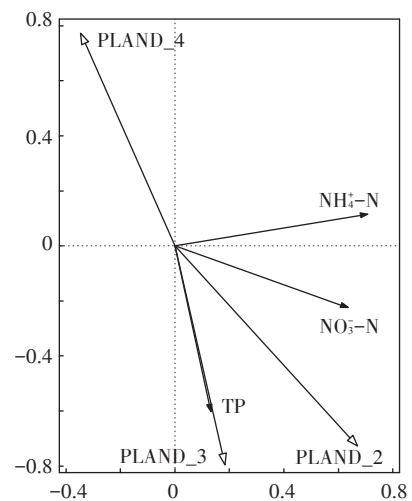
表4 景观组成对干季水质的冗余分析结果

Table 4 RDA analysis results of land use composition on water quality in dry season

土地利用类型 Land use type	解释度 Explanation/%	贡献率 Contribution/%
道路	22.3	45.5
村庄	14.5	29.6
沟塘	12.2	24.9
总计	49.0	100

如图7所示。沟塘类型中,PD、ED与污染物浓度呈负相关,LSI与干季的TP、NO₃-N呈强负相关,而IJI与TN、TP浓度呈正相关。景观水平上的PD和ED与污染物浓度呈正相关,这与Bu等^[26]的研究结果一致,这是由于景观水平上,缓冲区内产生污染物的“源”斑块相对较多,对污染物的作用大于沟塘斑块的消解作用。其他类型水平LSI和ED与污染物浓度相关性较强,道路、农田等类型的LSI越大,表明受人类活动干扰越强,则水质越差。

对不同计算水平景观指数和水质进行冗余分析,结果如表5所示。类型水平上的景观指数对水质解释度为56.4%,远大于景观水平上的景观指数。各斑



图中PLAND代表景观面积,后缀数字2,3,4依次代表道路、村庄、沟塘
PLAND represented the landscape area, and the suffix 2, 3, 4 represented road, village, ditch-pond in turn

图5 景观组成对干季水质冗余分析

Figure 5 RDA analysis of land scape composition on water quality in dry season

块类型中,沟塘斑块的解释度高于其他斑块类型。

将沟塘类型景观指数与各时段水质进一步分析,根据冗余分析重要性和显著性结果,选择沟塘ED、

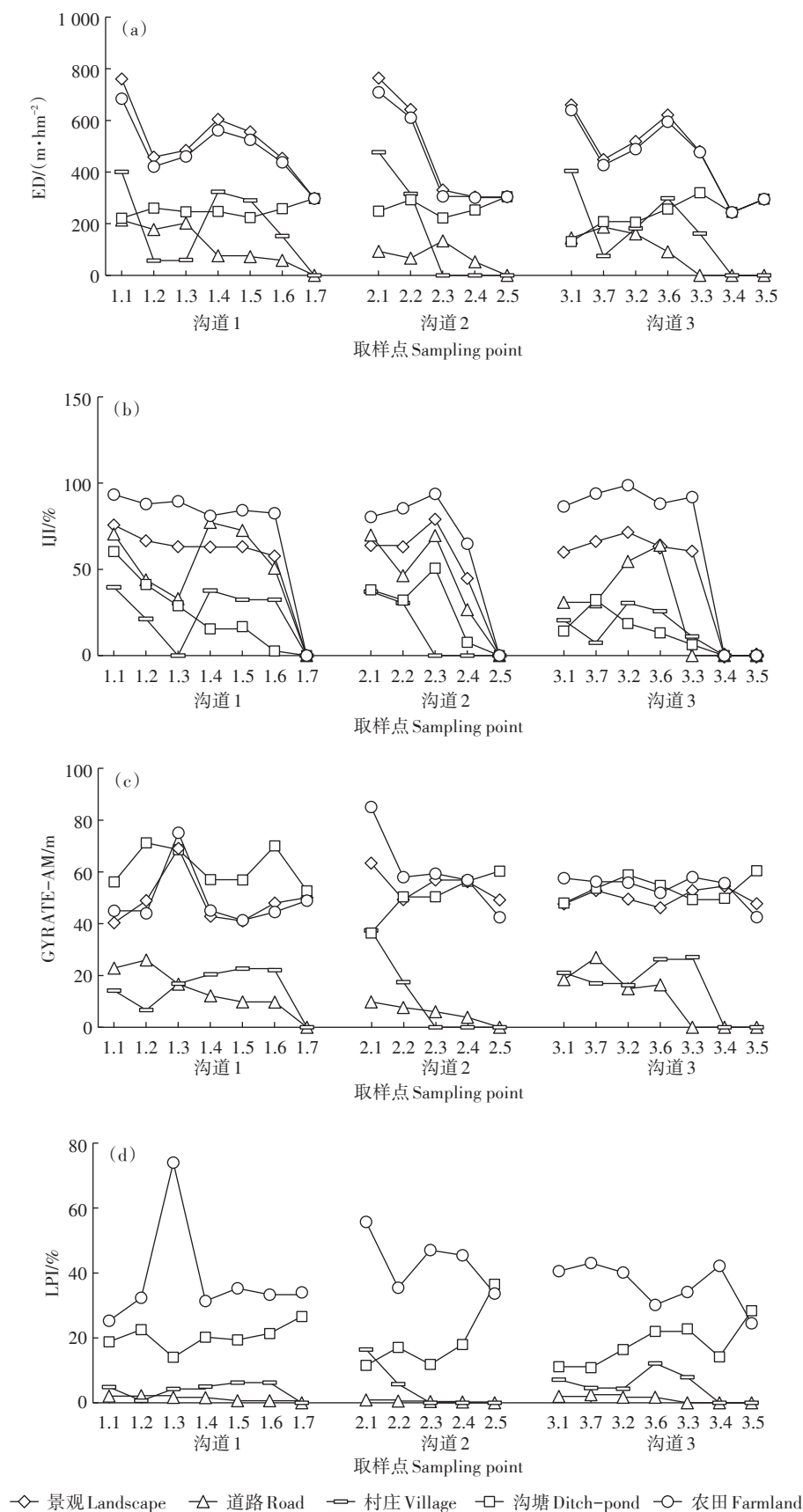
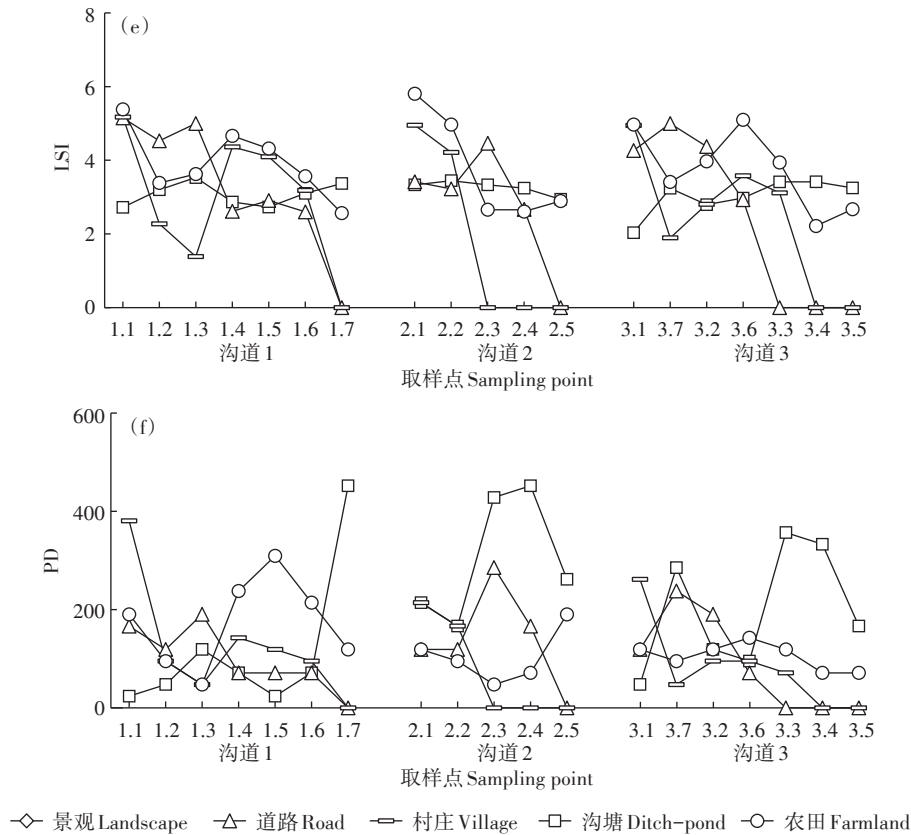


图6 景观指数趋势分布

Figure 6 Trends of landscape metrics



图中景观代表该指数在景观水平上的计算值;地类名称代表该指数在类型水平上的计算值

Landscape represents the calculates value of the index at the landscape level;the land use name represents the calculated value of the index at the class level

续图6 景观指数趋势分布

Continued figure 6 Trends of landscape metrics

IJI、GYRATE-AM 3个表征指标。如表6所示,沟塘景观结构对于全年、干季、湿季的解釋度依次是35.3%、47.3%、15.7%,对干季的水质解釋度最高。表7显示了各景观指数的重要性以及贡献率,其中沟塘ED对所有时段的水质变化均有重要影响。

沟塘结构和水质变量冗余分析结果如图8所示,沟塘景观变量与水质变量夹角小于90°为正相关,否则为负相关,接近90°基本无相关性。沟塘ED与干季的NO₃-N、TP浓度呈强负相关,GYRATE-AM和IJI与干季NH₄⁺-N浓度呈强正相关,表明沟塘斑块边界越复杂、离散程度越小,对水质越有利。

3 讨论

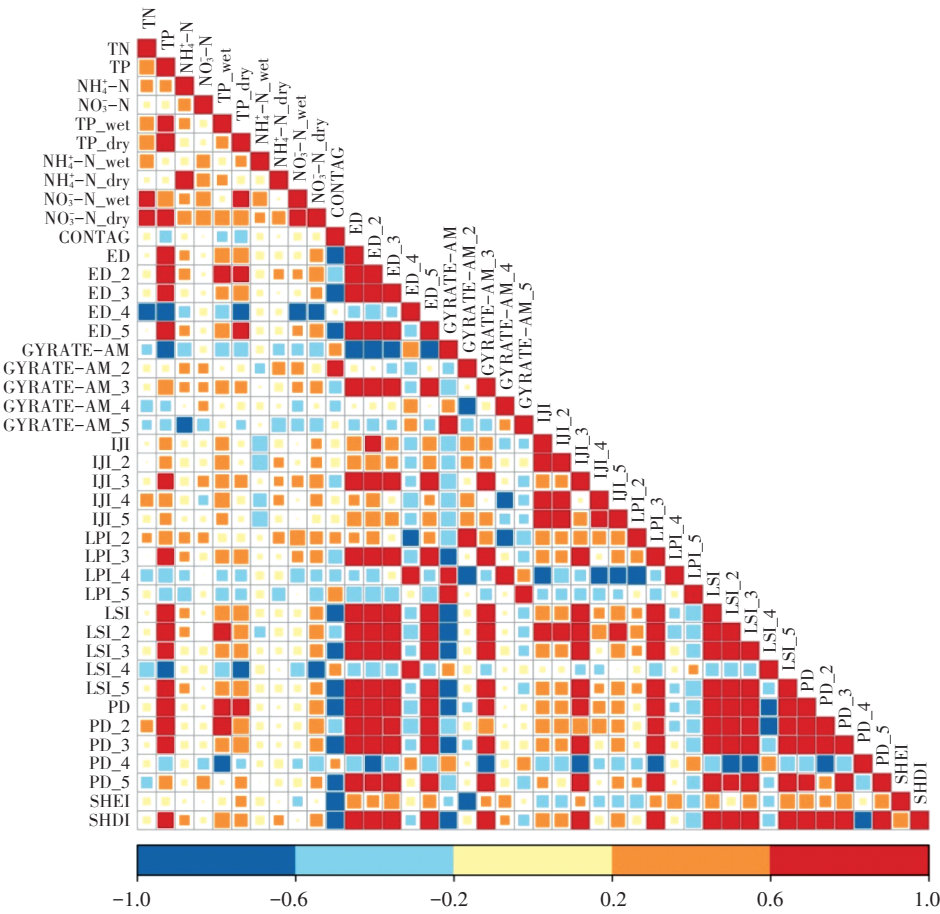
3.1 景观组成对水质的影响

沟道两侧景观组成对水质有重要影响,各组成类型对水质的解釋度从大到小排序依次为:道路>村庄>沟塘,农田排序结果未通过检验。沟塘面积与污染物浓度为负相关,表明景观中沟塘等“汇”面积的增加,减小了农田对整个地块的主导作用,因而对水质更有

利^[27]。三条沟道中大部分污染物的高浓度值都聚集在中上游,这与村庄和道路聚集在各沟道的中上游有关。道路与污染物浓度呈较强正相关,说明道路不利于污染物的消解,道路的增加会切断污染物径流,加快土壤侵蚀,增加污染物负荷^[14]。村庄与水质的Pearson相关性相对较弱,但在冗余分析中村庄与总磷浓度呈强正相关,生活污水的排放和农田污染物的汇集导致上游污染物浓度较高。农田与污染物浓度表现为正相关,这与Zhang等^[28]和Bahar等^[29]的研究结果一致。但已有的研究表明农田与水质的关系存在不确定性,这主要是因为景观组成作用强度不同,比如张大伟等^[30]的研究发现农田与水质呈正相关,是由于农田对污染物的贡献远不及建设用地,耕地与建设用地对水质的作用体现为“此消彼长”的强弱作用,而不是农田对水质的改善作用。

3.2 景观结构对水质的影响

在类型水平上,所有斑块共同作用下景观结构对水质的解釋能力达到56.4%,与景观组成相反的是,单一景观类型中沟塘结构对水质的解釋度最大。景



图中类型水平景观指数后缀数字2、3、4、5依次代表道路、村庄、沟塘、农田
The landscape metrics at class level had suffix number 2, 3, 4, 5, which represented road, village, ditch-pond and farmland in turn

图 7 景观结构与水质 Pearson 相关性图

Figure 7 Pearson's correlation of landscape structure and water quality

表 5 不同类型水平上景观指数与总体水质变量冗余分析结果

Table 5 Redundancy analysis results of landscape metrics and total water quality variables at different levels

变量类型 Variable type	解释度 Explanation/%	变量个数 Number of variables	变量类型 Variable type	解释度 Explanation/%	变量个数 Number of variables
整体景观	78.5	7	道路	39.7	2
景观水平	11.7	1	村庄	—	—
类型水平	56.4	4	农田	11.6	1
			沟塘	42.0	3

观水平上的景观指数对水质的解释度低于类型水平上的景观指数,说明斑块水平上的景观指数更能有效预测河流水质^[16],这一点在本研究的沟塘类型景观指数上表现更为明显。

三组景观结构数据中,沟道2形态最复杂且分布最聚集,这与沟道2中各项污染物浓度最低相对应,即沟塘边缘形状越复杂、斑块越聚集,对水质越有利^[14]。与水质联系较为紧密的三个沟塘类型景观指数为边缘密度、散布与并列指数和平均回转半径,其

中边缘密度在不同时段对水质的解释度均最高。边缘密度能有效反映沟塘景观拦截污染物的边缘效应,对于沟塘或森林等能够拦截污染物的景观类型,较高的边缘密度意味着更复杂的边界和更好的过滤效果^[21]。散布与并列指数以及平均回转半径能够有效反映景观离散程度,较为聚集的沟塘斑块能够有效净化水质。沟塘景观结构在不同季节对水质有不同的影响,与湿季 15.7% 的解释度相比,干季水质的解释度达到了 47.3%,沟道两侧景观组成对干季水质解释

表6 沟塘景观指数与水质参数冗余法分析结果

Table 6 Redundancy analysis of landscape metrics and pollutant concentrations

时段 Time	参数 Parameter	轴 1 Axis 1	轴 2 Axis 2	轴 3 Axis 3	轴 4 Axis 4	方差解释总量 Total explained variance/%
全年	特征值	0.26	0.09	0.45	0.10	35.3
	累积相关百分比/%	26.48	35.25	79.82	89.52	
干季	特征值	0.36	0.11	0.00	0.37	47.3
	累积相关百分比/%	35.94	46.92	47.26	84.45	
湿季	特征值	0.16	0.62	0.15	0.07	15.7
	累积相关百分比/%	15.71	78.09	92.86	100.00	

表7 冗余分析解释变量结果

Table 7 Explaining variable results in RDA analysis

时段 Time	参数 Parameter	ED	GYRATE-AM	IJI
干季	解释度/%	18.7	14.1	14.4
	贡献率/%	39.6	30.5	29.9
全年	解释度/%	25.2	10.0	—
	贡献率/%	71.5	28.5	—
湿季	解释度/%	15.7	—	—
	贡献率/%	100.0	—	—

理和沟塘生态系统的保护具有重要意义。本研究采用沟塘面积变化动态模型,能够从一定程度反映沿沟道距离变化的面积动态变化特征,在以后的研究中有必要结合其他参数对沟塘结构变化进行进一步的解释。本研究缺乏对不同分段的水质状况与景观指数的对应分析,对沟塘景观与水质结合的动态过程关注不足,景观指数与水质生态过程及动态过程的联系仍是今后研究的重要方向^[31-33]。

4 结论

本研究以江苏省扬州市江都区为例,对小流域水质空间分布变化和沟塘景观特征之间的联系进行探讨,结论如下:

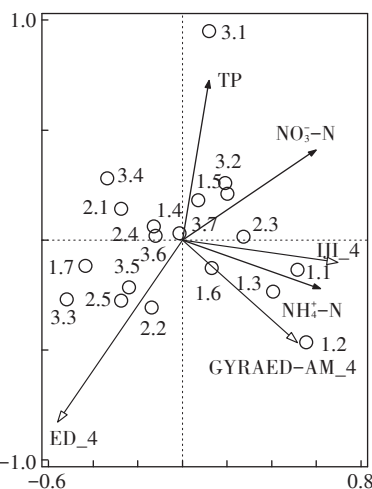
(1)沟塘水质对景观特征的响应存在季节差异,与湿季相比,沟塘景观特征与干季水质相关性较强,对干季水质的解释度较高,能够达到47.3%。

(2)沟塘结构对水质有重要影响,沟塘类型景观指数能够解释15.7%~47.3%的水质变化,对水质变化解释度最高的沟塘类型景观指数分别为边缘密度、散布与并列指数以及平均回转半径,表明聚集的沟塘斑块和复杂的边界条件对水质有利。其中沟道边缘密度对水质的解释度最高,在不同时段均有重要影响。

(3)在景观组成上,沟塘相较于其他斑块类型作用相对较弱;而在景观结构上,沟塘的作用强度高于其他斑块类型。

参考文献:

- [1] 罗纨,朱金城,贾忠华,等.排水沟塘分布特性及与农田水力联系对水质净化能力的影响[J].农业工程学报,2017,33(10):161-167. LUO Wan, ZHU Jin-cheng, JIA Zhong-hua, et al. Effect of distribution characteristic and field hydraulic connection of drainage ditches and ponds on water quality purification[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(10): 161-167.
- [2] 刘红玉,李玉凤,曹晓,等.我国湿地景观研究现状、存在的问题与发展方向[J].地理学报,2009,64(11):1394-1401. LIU Hong-yu,



图中空心箭头为沟塘景观指数,实心箭头为水质变量
The hollow arrow is the landscape index of ditch-pond, and the solid arrow is the water quality variable

图8 沟塘景观结构与干季水质冗余分析

Figure 8 Redundancy analysis of landscape structure and water quality in dry season

度较高,说明景观特征与干季水质有较强相关性。景观特征与湿季水质相关性较弱,可能由于湿季农田集中施肥且径流量较大,增加了田间营养物质流失,导致田间复杂的水质状况。

研究平原河网地区沟塘景观结构对水质的影响,能够为当前“双评价”工作提供一定的参考,在“三区三线”等国土空间规划背景下,对于农村水环境治

- LI Yu-feng, CAO Xiao, et al. The current problems and perspectives of landscape research of wetlands in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(11):1394-1401.
- [3] 徐慧, 徐向阳, 崔广柏. 景观空间结构分析在城市水系规划中的应用[J]. 水科学进展, 2007, 18(1):108-113. XU Hui, XU Xiang-yang, CUI Guang-bai. Application of landscape spatial structure analysis to urban river system planning[J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(1):108-113.
- [4] Ai L, Shi Z H, Yin W, et al. Spatial and seasonal patterns in stream water contamination across mountainous watersheds: Linkage with landscape characteristics[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 523:398-408.
- [5] Zhou Y, Xu J F, Yin W, et al. Hydrological and environmental controls of the stream nitrate concentration and flux in a small agricultural watershed[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 545:355-366.
- [6] 杜文杰, 龚建周, 胡月明, 等. 珠江三角洲林地结构现状及景观梯度分异特征[J]. 生态科学, 2019, 38(2):67-76. DU Wen-jie, GONG Jian-zhou, HU Yue-ming, et al. The present situation of structure and characteristics of landscape gradient differentiation of woodland in the Pearl River Delta, China[J]. *Ecological Science*, 2019, 38(2):67-76.
- [7] 黄金良, 李青生, 洪华生, 等. 九龙江流域土地利用/景观格局-水质的初步关联分析[J]. 环境科学, 2011, 32(1):64-72. HUANG Jin-liang, LI Qing-sheng, HONG Hua-sheng, et al. Preliminary study on linking land use & landscape pattern and water quality in the Jiulong River watershed[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(1):64-72.
- [8] 汪朝辉, 谭德宝, 王克林, 等. 洞庭湖区景观镶嵌结构和分形特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15(5):579-583. WANG Zhao-hui, TAN De-bao, WANG Ke-lin, et al. Fractal model study on mosaic structure of Dongting Lake area[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2006, 15(5):579-583.
- [9] 王璐, 袁艳斌, 董恒, 等. 土地利用景观格局空间尺度效应研究——以武汉市为例[J]. 世界地理研究, 2020, 29(1):96-103. WANG Lu, YUAN Yan-bin, DONG Heng, et al. Research on spatial scale effect of landscape pattern of land use in Wuhan City[J]. *World Regional Studies*, 2020, 29(1):96-103.
- [10] 韩黎阳, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(3):1091-1097. HAN Li-yang, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, et al. Effects of land use and landscape pattern on nitrogen and phosphorus exports in Lanlingxi watershed of the Three Gorges Reservoir area, China[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(3):1091-1097.
- [11] 王杰, 李鹏, 高海东, 等. 丹江上游土地利用/景观指数与水质关系初探[J]. 水土保持研究, 2018, 25(6):383-389. WANG Jie, LI Peng, GAO Hai-dong, et al. Preliminary study on the relationship between land use/landscape index and water quality in the upper reaches of Danjiang River[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(6):383-389.
- [12] 朱珍香, 高肖飞, 彭凤, 等. 厦门后溪水质与流域景观特征沿城乡梯度的变化分析[J]. 生态学报, 2019, 39(6):2021-2033. ZHU Zhen-xiang, GAO Xiao-fei, PENG Feng, et al. Relationship between water quality and landscape characteristics of the Houxi River watershed in Xiamen City along a rural-urban gradient[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(6):2021-2033.
- [13] 王晶萍, 李兆富, 刘红玉, 等. 中田河流域景观异质性对水体总氮浓度影响研究[J]. 环境科学, 2016, 37(2):527-533. WANG Jing-ping, LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, et al. Influence of landscape heterogeneity on total nitrogen concentration in Zhongtian River watershed[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(2):527-533.
- [14] Clément F, Ruiz J, Rodríguez M A, et al. Landscape diversity and forest edge density regulate stream water quality in agricultural catchments[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 72:627-639.
- [15] 李昆, 谢玉静, 孙伟, 等. 农业主产区湖泊水质对湖滨带多尺度景观格局的空间响应[J]. 应用生态学报, 2020, 31(6):2057-2066. LI Kun, XIE Yu-jing, SUN Wei, et al. Spatial response of lake water quality to multi-scale landscape pattern of lakeside zone in agricultural watershed[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(6):2057-2066.
- [16] Shen Z Y, Hou X S, Li W, et al. Relating landscape characteristics to non-point source pollution in a typical urbanized watershed in the municipality of Beijing[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 123:96-107.
- [17] 姜旭娟, 刘茂松, 陈奋飞, 等. 河流水质与土地利用及河道结构特征关系的对比分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2015, 39(2):91-96. JIANG Xu-juan, LIU Mao-song, CHEN Fen-fei, et al. Correlations analysis of river water quality with land use and river structure[J]. *Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition)*, 2015, 39(2):91-96.
- [18] 李玉凤, 刘红玉, 刘军志, 等. 农村多水塘系统景观结构对非点源污染中氮截留效应的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(11):4999-5006. LI Yu-feng, LIU Hong-yu, LIU Jun-zhi, et al. Effect of different multi-pond network landscape structures on nitrogen retention over agricultural watersheds[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(11):4999-5006.
- [19] 鞠洪润, 左丽君, 张增祥, 等. 中国土地利用空间格局刻画方法研究[J]. 地理学报, 2020, 75(1):143-159. JU Hong-run, ZUO Li-jun, ZHANG Zeng-xiang, et al. Methods research on describing the spatial pattern of land use types in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(1):143-159.
- [20] 许珊, 邹滨, 蒲强, 等. 土地利用/覆盖的空气污染效应分析[J]. 地球信息科学学报, 2015, 17(3):290-299. XU Shan, ZOU Bin, PU Qiang, et al. Impact analysis of land use/cover on air pollution[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2015, 17(3):290-299.
- [21] Uuemaa E, Roosaare J, Mander Ü. Scale dependence of landscape metrics and their indicator value for nutrient and organic matter losses from catchments[J]. *Ecological Indicators*, 2005, 5(4):350-369.
- [22] 何鹏, 张会儒. 常用景观指数的因子分析和筛选方法研究[J]. 林业科学研究, 2009, 22(4):470-474. HE Peng, ZHANG Hui-ru. Study on factor analysis and selection of common landscape metrics[J]. *Forest Research*, 2009, 22(4):470-474.
- [23] McGarigal K, Marks B J. FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for categorical maps[EB/OL]. (1995)[2020-08-07]. <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>.
- [24] 马宗义, 颜耀文, 余林, 等. 单一景观类型时空变化分析方法——

- 以酒泉盆地绿洲化为例[J]. 地理科学进展, 2012, 31(12): 1732-1738. MA Zong-yi, XIE Yao-wen, YU Lin, et al. Models for analysis of the spatial-temporal changes of a single-type landscape: A case study of oasis-making process in Jiuquan basin[J]. *Progress in Geography*, 2012, 31(12): 1732-1738.
- [25] 任玲玲, 栗云召, 于森, 等. 1984—2015年黄河三角洲人工湿地的演变及主要驱动因子[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(4): 493-502. REN Ling-ling, LI Yun-zhao, YU Miao, et al. Evolution of artificial wetlands in the Yellow River Delta and related driving factors during 1984—2015[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(4): 493-502.
- [26] Bu H M, Meng W, Zhang Y, et al. Relationships between land use patterns and water quality in the Taizi River basin, China[J]. *Ecological Indicators*, 2014, 41: 187-197.
- [27] Li Y F, Wright A, Liu H Y, et al. Land use pattern, irrigation, and fertilization effects of rice-wheat rotation on water quality of ponds by using self-organizing map in agricultural watersheds[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2019, 272: 155-164.
- [28] Zhang L, Lu W X, Hou G L, et al. Coupled analysis on land use, landscape pattern and nonpoint source pollution loads in Shitoukoumen Reservoir watershed, China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 51: 101788.
- [29] Bahar M M, Ohmori H, Yamamuro M. Relationship between river water quality and land use in a small river basin running through the urbanizing area of central Japan[J]. *Limnology*, 2008, 9: 19-26.
- [30] 张大伟, 李杨帆, 孙翔, 等. 入太湖河流武进港的区域景观格局与河流水质相关性分析[J]. 环境科学, 2010, 31(8): 1775-1783. ZHANG Da-wei, LI Yang-fan, SUN Xiang, et al. Relationship between landscape pattern and river water quality in Wujingang region, Taihu Lake watershed[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(8): 1775-1783.
- [31] 陈利顶, 刘洋, 吕一河, 等. 景观生态学中的格局分析: 现状、困境与未来[J]. 生态学报, 2008, 28(11): 5521-5531. CHEN Li-ding, LIU Yang, LÜ Yi-he, et al. Landscape pattern analysis in landscape ecology: Current, challenges and future[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(11): 5521-5531.
- [32] 陈利顶, 傅伯杰, 赵文武. “源”“汇”景观理论及其生态学意义[J]. 生态学报, 2006, 26(5): 1444-1449. CHEN Li-ding, FU Bo-jie, ZHAO Wen-wu. Source-sink landscape theory and its ecological significance[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1444-1449.
- [33] 许尔琪. 土地利用对水体营养物影响的研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2019, 27(12): 1880-1891. XU Er-qi. Research progress in the impact of land use on water nutrients[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(12): 1880-1891.