

DOI: 10.5846/stxb201801130100

刘怡娜, 孔令桥, 肖焱, 郑华. 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): - .

Liu Y N, Kong L Q, Xiao Y, Zheng H. Relationships between landscape pattern and ecosystem water purification service in the Yangtze River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(3): - .

长江流域景观格局与生态系统水质净化服务的关系

刘怡娜^{1,2}, 孔令桥^{1,2}, 肖焱^{1,2}, 郑华^{1,2,*}

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 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 流域景观格局通过影响生态过程, 改变进入河流污染物的数量, 进而对水质净化服务产生重要影响, 探讨流域景观格局对水质净化服务的影响对于流域景观规划、生态系统保护和生态系统服务提升具有重要意义。以长江流域为研究区域, 在分析 45 个子流域景观格局特征、应用 InVEST 模型评估流域水质净化服务基础上, 探讨了两者的关系, 结果表明: ①景观组成上, 长江流域农田和城镇面积比例分别与生态系统水质净化服务存在显著对数关系 ($P < 0.01$), 森林面积比例则与之呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$); ②流域景观配置上, 斑块密度和景观破碎度与水质净化服务呈显著负相关 ($P < 0.01$), 而平均斑块面积和形状规律相反 ($P < 0.01$); ③斑块类型水平上, 森林平均斑块面积、灌丛/湿地平均斑块形状与生态系统水质净化服务呈显著正相关 ($P < 0.01$), 而农田平均斑块面积/边缘密度、城镇斑块密度则与之呈显著负相关 ($P < 0.01$); ④森林主导景观的子流域, 仅有景观破碎度与生态系统水质净化服务呈显著负相关, 而农田主导景观的子流域, 景观蔓延度、香农多样性与其分别呈正相关 ($P < 0.01$)。研究结果可以为长江流域生态系统水质净化服务的提升提供多途径的管理信息: 流域景观尺度上, 增加森林面积比例、控制农田与城镇面积比例, 并减少景观破碎度而增加平均斑块形状复杂性; 斑块类型水平上, 可增加灌丛/湿地斑块形状复杂性, 减小农田边缘密度和城镇斑块密度; 森林主导景观的子流域应降低景观破碎度, 以农田主导景观的子流域则应该增加斑块类型丰富度和团聚程度。这些信息也可为其他流域水质净化服务管理提供参考。

关键词: 景观格局; 景观指数; 水质净化服务; 非点源污染; 长江流域

Relationships between landscape pattern and ecosystem water purification service in the Yangtze River Basin

LIU Yina^{1,2}, KONG Lingqiao^{1,2}, XIAO Yi^{1,2}, ZHENG Hua^{1,2,*}

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

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Landscape patterns can affect pollutant discharge into rivers by influencing ecological processes, and further affect water purification service of ecosystems in the watershed. It is of great significance for landscape planning, ecosystem protection, and ecosystem services promotion to explore the relationships between landscape patterns and ecosystem water purification service. The landscape pattern characteristics were analyzed and ecosystem water purification service was assessed by using InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) model in 45 sub-basins of the Yangtze River Basin. Then the relationships between landscape patterns and ecosystem water purification service were identified. For the landscape composition, the proportions of farmland and urban areas were logarithmically correlated with ecosystem water purification service ($P < 0.01$), whereas the proportion of forest area was positively correlated with it ($P < 0.01$). For the landscape configuration, water purification service was negatively correlated with patch density and

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0503401); 中国科学院科技服务网络计划项目 (KFJ-STS-ZDTP-022)

收稿日期: 2018-01-13; **网络出版日期:** 2018-00-00

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

landscape fragmentation, and positively correlated with the average patch area and shape ($P < 0.01$). For the patch-type, average patch area of forest/shrub and the average patch shape of shrub and wetland were positively correlated with ecosystem water purification service, while the average patch area and edge density of farmland and urban patch density were negatively correlated with water purification service ($P < 0.01$). Only landscape fragmentation and the ecosystem water purification service was negatively correlated in the forest-dominated sub-basin ($P < 0.01$). In the farmland-dominated sub-basin, ecosystem water purification services were positively correlated with landscape aggregation and Shannon diversity indexes ($P < 0.01$). The above results can provide management information for the promotion of ecosystem services in the Yangtze River basin. At the landscape scale of the basin, increasing the area proportion of forest, controlling the farmland and urban area proportions, reducing the landscape fragmentation, and increasing the complexity of the average patch shape would be helpful for the improvement of ecosystem water purification service. At the patch-type level, increasing the area of the shrub patch and the shape complexity of the shrub and wetland patches, and reducing the edge density of urban and the patch density of farmland would also contribute to the promotion of ecosystem water purification service. In the forest-dominated sub-basins, landscape fragmentation should be prevented, while the diversity and aggregation of different types of patches should be increased in the farmland-dominated sub-basins. The information can also provide important for the management of ecosystem water purification service in other basins.

Key Words: landscape pattern; landscape pattern index; water purification services; non-point source pollution; the Yangtze River Basin

景观格局强烈影响着生态过程,尤其是障碍、通道和高异质性区域的组合在很大程度上决定着景观中能量、物质的交换和流动^[1-2],流域景观格局变化对养分等非点源污染物发生、迁移和转化的影响主要表现在流域景观组成和配置的变化引起生态系统物质和能量流动过程的变化^[3],从而改变进入河流污染物的数量,对流域水质净化服务产生重要影响^[4]。优化景观格局,源头减少非点源污染物的产生,并在污染物运移过程中不断进行拦截、吸收并促进其向无害形态转化,是改善水质净化服务非常经济而有效的措施^[5-6]。因此,探讨景观格局与生态系统服务的关系对于流域景观规划和生态系统服务提升具有重要意义。

已有大量研究表明:景观格局与区域水生态服务之间存在明显的相关关系^[7-9]。主要集中在以景观组成、景观格局的空间特征为基础,运用相关分析、多元回归分析、主成分分析、方差分析及模型分析等方法,建立景观指数与流域水质净化服务之间的量化关系,探究不同景观尺度下(河岸缓冲区、流域尺度等)对水质净化服务的影响^[10-14]。如 Kearns^[15]以 2200 km²的流域划分为 84 个子流域,分析景观格局指数与水质特征的相关性,结果表明斑块密度和斑块形状可解释 85%的相关性;赵鹏等^[16]运用多变量分析方法,分析流域、河岸带尺度的景观组成和空间格局指数与水质的相关关系,结果发现流域尺度的景观指数比河岸带尺度的景观指数对水质影响更大。然而,现有研究大部分只单独考虑景观组成或景观配置与水质净化服务间的关系,且很少涉及相关机理,同时由于研究区的多样性及许多景观指数的不确定性,造成两者的关系研究更加随机,进而需要在更广泛的地区展开研究,本研究则以“景观格局-生态过程-生态系统服务”的内在关系为纽带,以期进一步确立两者间关系^[17-19]。

长江流域由于跨越区域大,人类活动影响程度不同,绝大多数江段处于半自然半人工状态,连通性和物质通量受人类活动影响显著,景观格局变化剧烈,使得河段生态系统的结构和功能呈现出断续状态,造成水污染风险加大^[20]。本文以长江流域为研究对象,应用 InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) 软件中的水质净化模型模拟长江流域水质净化服务;然后分别以水质净化服务浓度、景观指数表征水质净化服务及景观格局特征,综合应用 Spearman 秩相关分析、聚类分析和多元线性逐步回归模型研究景观格局对水质净化服务的影响;同时辨析不同主导景观的流域类别中,景观格局对水质净化服务影响的差异,其目的是:阐明长江流域景观格局组成与景观配置对生态系统水质净化的影响,为通过优化流域景观格局、提升

生态系统水质净化服务提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区域

本研究区长江流域是中国第一大流域,位于 $24^{\circ}27'—35^{\circ}54'N$, $90^{\circ}33'—122^{\circ}19'E$ 之间,其流域面积约为 180 万 km^2 ,占全国总面积的 18.8%。长江流域地形西高东低并呈现三大阶梯状,其多年平均降水量为 1100 mm 左右,约占全年的 70%—90%,地区分布很不均匀,且长江流域径流量居全国河流之首,占全国总径流量的 35.1%。近年来,长江流域人类活动加剧,一方面,土地开垦、水资源开发利用、城市化以及生态保护与建设等导致流域景观格局发生剧烈变化;另一方面,随着污染物排放的不断增加,长江流域水环境污染风险也不断增加^[21]。

1.2 子流域划分与景观类型

以研究区 2000 年土地利用/土地覆盖数据为基础,利用 ArcMap 10.2 软件,将长江流域土地利用与土地覆盖分为森林、灌丛、草地、湿地、农田、城镇和裸地 7 类,再根据水系特征将流域划分为 45 个子流域。(图 1)

1.3 流域水质净化服务指标

本研究通过运行 InVEST 模型的“水质净化”子模块,计算 2000 年长江流域各子流域水质净化服务状况。水质净化服务高低通常是以单位面积生态系统总氮输出的多少或持留量来表征,本文选择前者(单位面积生态系统总氮输出的倒数, hm^2/kg) 表征水质净化服务的大小,即:单位面积生态系统总氮输出越少,水质净化服务越高。

“水质净化”模型主要是基于各类生态系统营养盐的输出系数以及其对营养盐的持留效率确定生态系统水质净化服务大小,该模型仅考虑非点源污染。主要算法为:

$$ALV_x = HSS_x \cdot pol_x$$

式中, ALV_x 为栅格 x 调节的载荷值, pol_x 为栅格 x 的输出系数, HSS_x 为栅格 x 的水文敏感得分值。该模块的主要参数是土地利用/土地覆盖类型、总氮输出负荷、DEM、产水量数据等(表 1),其中产水量数据由“产水量”模型的结果提供,其他模型输入参数基于流域相关数据和模型要求的格式确定^[22]。

我们选取屏山站的水质监测数据对金沙江石鼓以上和金沙江石鼓以下两个子流域的氮输出总量进行验证(检测指标包括:氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮、总氮)^[23]。监测站点全年氮输出总量为 10.07 万 t,模型模拟结果为 10.60 万 t,通过比较,匹配度为 95.0%,并以验证后的水质净化模型探讨长江流域景观格局与水质净化服务的关系。

1.4 景观格局分析方法

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某些方面的特征^[24],目前,很多学者将其应用于分析景观格局^[11-15]。景观指数众多且部分指数间信息重复,Riitters 等^[25]曾选出 5 个相互独立,且较能全面描述景观格局的指数,即:平均斑块周长面积比、蔓延度指数、斑块形状指数、相对斑块面积和斑块类型指数;李秀珍等^[19]则认为比较值得推荐的指标包括:总斑块数目、平均斑块大小、总边界密度、分维数、蔓延度和聚集度。基于前人研究成果,本文在充分考虑各个景观指数生态学意义基础上,利用 Spearman 相关分析筛选出相对独立的景观指数,从景观破碎度、形状、蔓延度、多样性 4 个方面描述流域内景观格局特征,并利用 Fragstats 4.2 软件计算各子流域范围内景观格局指数(表 2)。

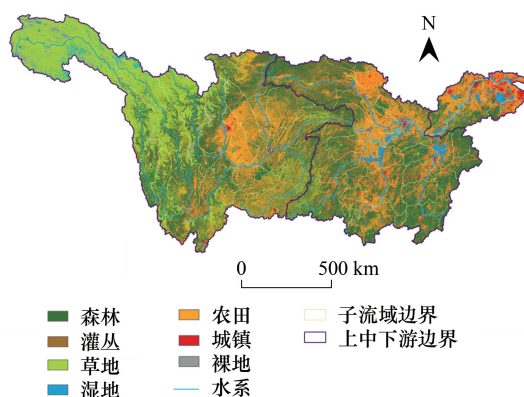


图 1 长江流域土地利用/土地覆盖及子流域划分

Fig.1 Land use /land cover and sub-watershed division in the Yangtze river

表 1 长江流域水质净化服务评估模型生物物理参数表

Table 1 Assessment table of biophysical parameters for assessment of water quality in Yangtze river

土地利用/土地覆盖 Land use/land cover		平衡常数 Equilibrium constant	根深 Root depth	氮溶解比 Nitrogen dissolution ratio	氮负荷 Nitrogen load	氮最大持 留效率 Maximum nitrogen retention efficiency	氮最大持 留量 Maximum nitrogen retention
森林 Forest	阔叶林	1.2	7000	0	2.8	0.8	150
	针叶林	1	7000	0	2.8	0.8	150
	针阔混交林	1.1	7000	0	2.8	0.8	150
灌丛 Shrub	灌木	0.8	5100	0	2.8	0.8	150
草地 Grassland	草原	0.65	2600	0	8	0.75	150
湿地 Wetland	森/灌沼泽	1	5000	0	2.8	0.8	150
	草本沼泽	1	3000	0	2.8	0.8	150
	水体	1	1	0	2.8	0.8	150
农田 Framland	稻田	1	200	0.5	100	0.2	150
	旱地	0.8	2100	0.5	100	0.2	150
	园地	0.7	3000	0.5	100	0.2	150
城镇 Town	住宅	0.001	1	0	100	0.05	150
	城市绿地	0.65	2600	0	100	0.05	150
	交通用地	0.001	1	0	100	0.05	150
冰川/永久积雪 Glacier/permanent snow	冰川/永久积雪	0.001	1	0	0.001	0.01	150
裸地 Bare land	裸岩	0.001	1	0	4	0.01	150
	裸土	0.5	1	0	4	0.01	150
	沙地	0.001	1	0	4	0.01	150

表 2 景观指数的选择

Table 2 The choice of landscape pattern index

景观指数 Landscape pattern index		公式 The formula	指数描述 Index description	表征意义 Characterize the meaning
景观组成 Landscape composition	PLAND	$\frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{CA \times 100} [26]$	某一斑块类型的总面积占整个景观面积(CA)的百分比, %	景观组分面积比
景观配置 Landscape configuration	PD	$NP/CA [26]$	单位面积拥有的斑块个数, N/hm^2 , NP 为景观斑块总数	景观离散程度
	AREA_MN	$CA/n [26]$	景观或各类型中, 斑块的平均面积, hm^2	
	ED	$TE/CA [26]$	揭示景观类型被边界分割程度, m/hm^2 , TE 为斑块边界总长度	景观复杂程度
	SHAPE_MN	$\frac{0.25TE}{\sqrt{a_j}}/N_i [26]$	经数学转化的斑块边长与面积比	
	FN	$(NP-1)/N_e$ or $\bar{A}(N_i-1)/CA [27]$	景观被分割的破碎程度, N_e 为栅格总数, N_i 为某一斑块类型数, $\bar{A}$ 为各类型斑块平均面积	景观破碎程度

续表

景观指数 Landscape pattern index	公式 The formula	指数描述 Index description	表征意义 Characterize the meaning
CONTAG	$1 - \left(\frac{- \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m P_{(i,j)} \ln P_{(i,j)}}{\ln m} \right)^{[27]}$	表示景观不同斑块类型的团聚程度或 延展趋势,%	景观蔓延趋势
SHDI	$- \sum_{i=1}^m [P_i \ln (P_i)]^{[27]}$	描述斑块类型在景观中出现的概率及 其多样性	景观异质性

PLAND:斑块面积占比,percent of landscape;PD:斑块密度,patch density;AREA_MN:平均斑块面积,mean patch area;ED:边缘密度,edge density;SHAPE_MN:平均斑块形状,mean patch shape;FN:景观破碎度,fragmentation;CONTAG:蔓延度,contagion index;SHDI:香农多样性,shannon diversity index

1.5 统计分析

本研究采用统计分析软件 SPSS 20.0 中 Spearman 秩相关分析工具,对 2000 年各子流域的景观格局指数与水质净化服务指标数据进行相关性分析,以确定流域景观格局指数与河流水质净化服务参数之间复杂的相关关系,用变量 P 显著性概率作为评判标准检验, P 小于 0.05 被视为显著相关^[25]。

同时利用软件中 K-均值聚类对所有子流域进行主导景观相似的流域聚类,多元逐步回归分析用来分析不同主导景观类型子流域景观格局变量对水质净化服务的综合响应,其中以 0.05 为检验是否显著的标准, R^2 和 P 为回归统计值用来判定回归效果^[16]。

2 研究结果

2.1 水质净化服务空间特征

长江流域森林和农田是主要的土地利用/土地覆盖类型,其面积占长江流域总面积的 60%以上(图 2)。

长江流域 45 个子流域的水质净化服务呈现出明显的空间异质性(图 3),长江中游地区水质净化服务量较高,上、中、下游流域氮素平均输出强度分别为 4.63、3.98、5.17 kg/hm²,且上、下游输出总量是中游的 2.73 倍。长江上游流域中嘉陵江、宜宾至宜昌干流及乌江流域的水质净化服务明显偏低,N 素平均输出强度高达 6.60 kg/hm²。全流域中,水质净化服务强度较低的子流域主要有黄浦江區、渠江、广元昭化以下干流、巢滁皖及沿江诸河及赤水河流域,输出强度都大于 7 kg/hm²;水质净化服务强度较高的子流域主要有:通天河、直门达至石鼓、大渡河流域,其强度均在 2 kg/hm²以下。

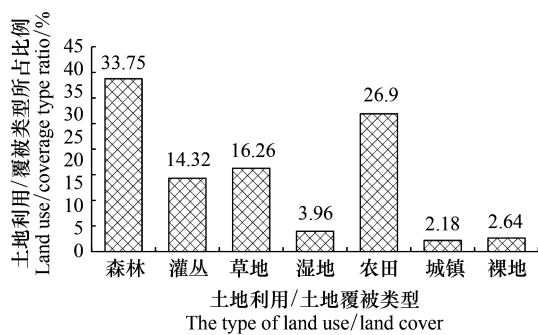


图 2 2000 年长江流域土地利用/土地覆盖类型

Fig.2 Land use/land cover of Yangtze river basin in 2000

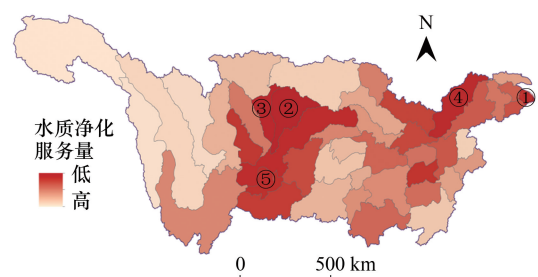


图 3 各子流域水质净化服务空间分异

Fig.3 Each sub-basin water purification services of spatial differentiation

①:黄浦江區;②:渠江;③:广元昭化以下干流;④:巢滁皖及沿江诸河;⑤:赤水河

2.2 景观组成对水质净化服务的影响

子流域中,农田和城镇所占比例愈大,流域水质净化服务越低;而森林和灌丛的比例越高,水质净化服务

越高(图4),表明长江流域的农业生产与城镇扩张活动对水质净化服务的影响显著,增加林地和灌丛面积有助于提高生态系统水质净化服务。

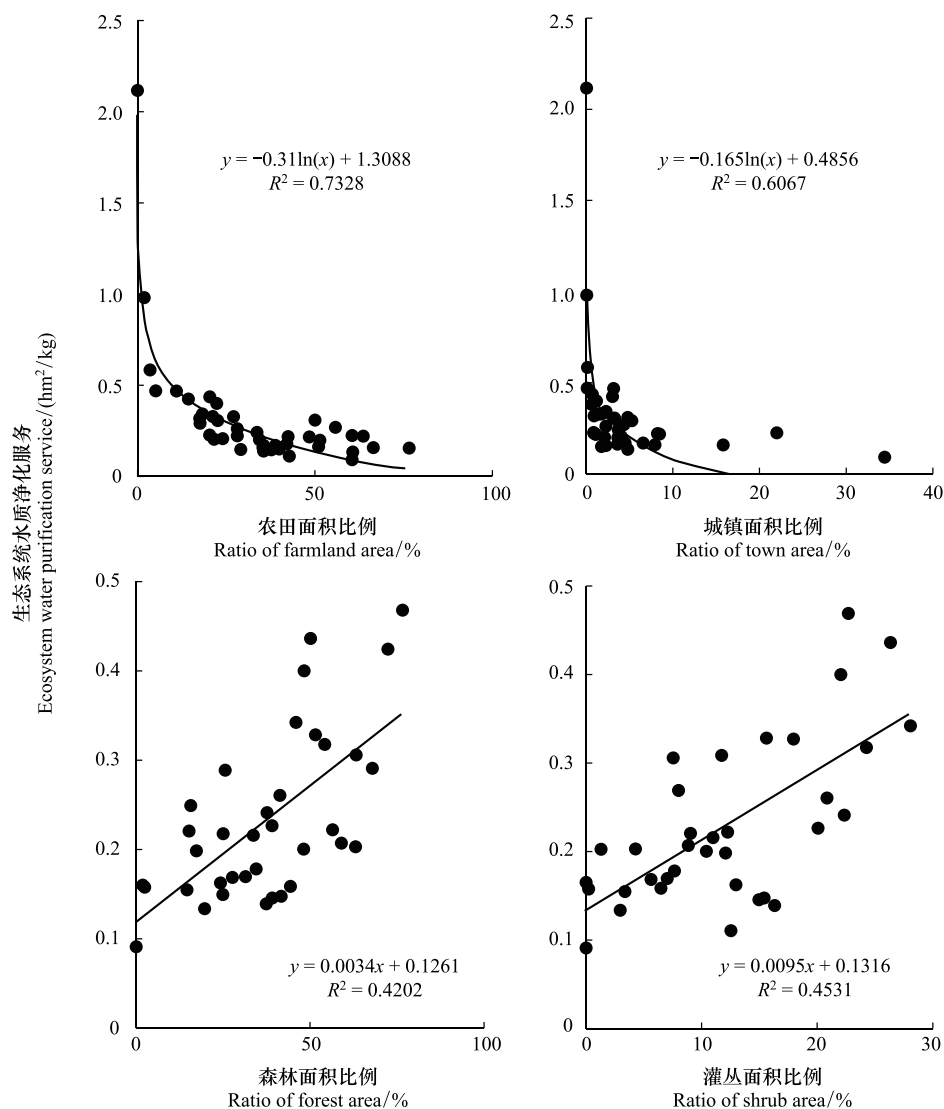


图4 景观组成与水质净化服务的关系

Fig.4 Relationship between landscape composition and water purification services

2.3 景观格局与水质净化服务的关系

景观水平上,斑块密度、平均斑块面积、平均斑块形状和景观破碎度与水质净化服务的显著性概率 P 均小于 0.01(表3),其中水质净化服务与斑块密度和景观破碎度呈显著负相关,与平均斑块面积和平均斑块形状呈显著正相关,表明水质净化服务受整体景观破碎度影响较大。

斑块类型水平上(表3),对于森林景观类型,水质净化服务受斑块密度、平均斑块面积及景观破碎度影响较大,且与斑块密度、景观破碎度呈显著负相关,与平均斑块面积呈正相关,表明森林景观破碎程度越高,斑块越离散都会降低生态系统水质净化服务;对于灌丛,其景观类型的平均斑块面积、平均斑块形状、边缘密度均与水质净化服务呈正相关,表明大斑块形状复杂的灌丛受人类活动干扰较小,有利于提高生态系统水质净化服务。

对于农田景观类型,边缘密度、平均斑块面积均与水质净化服务呈极显著负相关,表明聚集分布的农田斑块的形状越复杂,越会降低生态系统水质净化服务;对于城镇,水质净化服务与斑块密度表现出较强的负相关

关系,说明城镇的斑块离散程度较影响生态系统水质净化服务。

表3 景观水平及斑块类型水平景观格局与水质净化服务的关系

Table 3 Relationship between landscape pattern and patch type level landscape pattern and water purification service						
景观指数 Landscape index		PD	ED	AREA_MN	SHAPE_MN	FN
景观水平 Landscape level		-0.465 **	-0.24	0.465 **	0.368 *	-0.465 **
斑块类型水平	森林	-0.502 *	-0.134	0.462 **	-0.016	-0.417 **
Patch type level	灌丛	-0.065	0.320 *	0.425 **	0.477 **	0.26
	草地	0.093	0.284	0.291	0.113	0.261
	湿地	-0.273	-0.159	0.112	0.516 ***	-0.148
	农田	-0.08	-0.785 ***	-0.564 ***	0.093	0.159
	城镇	-0.318 *	-0.293	0.006	0.214	-0.289

* ; $P<0.05$; ** ; $P<0.01$; *** ; $P<0.001$;其他无显著相关性

2.4 基于主导景观的聚类分析

以7种景观类型作为变量,将45个子流域进行主导景观相似的K-均值聚类,进而分析存在差异的子流域类别的水质净化服务特征。结果最终分为两类:第一类主导景观为森林景观,占有景观类型的50%,共24个子流域;第二类则以农田景观为主导,占有景观类型的54%,共18个子流域(图5)。

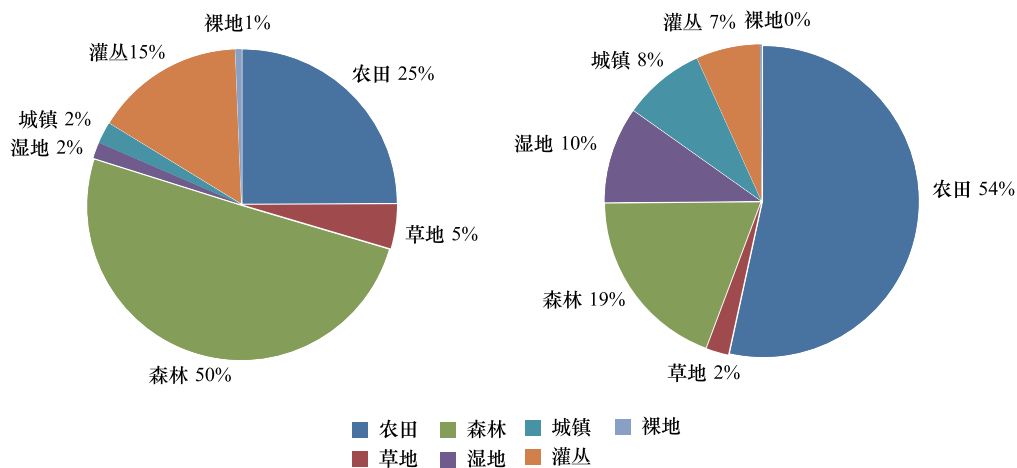


图5 两类主导景观类型子流域的土地利用/土地覆盖特征

Fig.5 Land use /land cover features of two types of sub-catchments of the main landscape types

两类主导景观类型子流域的水质净化服务与景观指数的逐步回归结果表明:森林主导景观子流域中,仅有景观破碎度与水质净化服务呈显著负相关,说明森林景观为主导的流域,其景观破碎化是影响水质净化服务的主要影响因素。

农田主导景观子流域中,景观格局对水质净化服务的影响明显强于森林主导景观子流域,即农田为主导景观的子流域景观格局能够解释61.4%的水质净化服务变异(表4)。其中,水质净化服务与聚集度、香农多样性呈正相关关系。说明农田为主导景观的子流域内斑块类型越丰富,异质性越大,且不同斑块类型团聚程度越高,越有利于提高生态系统水质净化服务。

4 讨论

4.1 景观组成对水质净化服务的影响

流域水质净化服务与景观组成存在密切的关系,本研究中,农田、城镇、森林、灌丛是影响流域水质净化服务的主要类型,其中,农田和城镇是导致水质净化服务退化的主要贡献源,大面积森林和灌丛则能有效保护流

域水质净化服务,该结果与已有研究成果相类似^[26-28]。城镇中硬质景观逐渐取代绿色景观的转变,使下垫面失去了对污染元素的截留与吸收作用,进而造成水域中污染浓度增加,水质净化服务退化^[11]。因此,长江流域的城镇扩张规划管理问题应该和水生态功能治理一同考虑,特别是下游水质净化服务退化严重的区域尤需要重视。

表 4 两类景观组成类型与水质的回归分析结果

Table 4 Regression analysis results of two types of landscape composition types and water quality

聚类类别 Clustering category	水质指标 Water quality indicators	FN	CONTAG	SHDI	R ²	P
森林主导景观 Forest dominated landscape	水质净化服务 (hm ² /kg)	-8.118			0.388	0.003
农田主导景观 Farmland dominated landscape		0.030	1.134	0.614	0.05	

R²: 回归方程对因变量的解释程度; P<0.05: 回归模型显著

同时,农田因其大面积过量使用农药、化肥、杀虫剂等,造成未被利用物质残留于水体、土壤和大气,并通过地表和地下径流、渗漏、淋溶、硝化等作用及沉积吸收、再析出等途径进入水体,成为对水质净化服务负效应的主要影响源^[29]。长江流域虽为我国重要的农业区,但仍应尽量控制农田比例,减少其对水质净化服务的影响。此外,很多科学研究都表明森林、草甸以及灌木植被和土壤系统的作用下,可以降低径流对土壤的侵蚀作用及减少径流中污染物的输出,从而改善水生态功能^[25]。长江流域中森林比例约 33.7%,因此,应科学利用其与水质净化服务的负效应,尽量增加森林与灌丛景观面积用以流域水生态保护。

4.2 流域景观格局对水质净化服务的影响

此次研究中,景观水平上,景观越破碎,异质性也越强,流域水质净化服务破坏的风险也随之变高。流域景观破碎度反映景观异质斑块间物质及能量流动的能力及相互作用的强度,能够直接影响景观中生态过程,对污染元素的迁移和转化有重要影响^[16]。水质净化服务又与平均斑块面积和平均斑块形状呈显著正相关,因此,平均斑块面积越小、形状越简单,表现出人类的干扰程度越大,而流域景观越破碎、斑块分布越零散,越损害生态系统水质净化服务,相反,斑块聚集程度愈大,愈有利于提高生态系统水质净化服务,即应用于长江流域景观格局,如果以少数聚集的优势大斑块为主,其水质净化服务相应较高。

斑块类型水平上,森林平均斑块面积与生态系统水质净化服务呈正相关性,而农田平均斑块面积与之呈显著负相关。因此,长江流域中森林斑块面积越大,农田面积越小,水质净化服务越高;农田边缘密度与生态系统水质净化服务呈显著负相关关系,可见,农田斑块的边界面积、空间位置及农业生产方式等对于流域水质净化服务的恢复极具意义,同时森林和城镇斑块密度与水质净化服务呈现显著负相关,表明若森林、城镇景观斑块离散程度越大,导致其斑块景观边界或其他斑块对水质净化服务的拦截概率或污染物的释放概率降低,对流域水质净化服务的负效应增加。

4.3 主导景观类型子流域景观格局对水质净化服务的影响

农田为主导的子流域景观格局中,景观蔓延度、香农多样性对水质净化服务有直接正效应。景观聚集度越大,多样性越高,各斑块之间粘合性越好,景观要素间分配更均衡,同时部分被截留转化,水质净化服务相对较好,反之亦然。因此,在具有污染输出效应的耕地为优势斑块的景观,其优势斑块的聚集和连通性会造成污染物输出的集中,对河流水质的影响也越显著。但有部分研究结论认为,香农多样性与河流水质存在负相关性^[16],其原因可能与流域主导景观类型有关,当其为水体污染“汇”景观时,景观多样性越大,景观异质性也随之增加,景观斑块类型增多使得各种斑块类型的分布也趋于均衡,水质净化服务降低,水质下降。

以具有污染物消减效应的森林为优势斑块的流域景观格局中,其对景观破碎程度最为敏感。因森林对流域水文生态功能有着重要的调节作用,可促进降雨再分配、影响土壤水分运动、改变产汇流条件,进而起到改善水质净化服务的作用。而景观越破碎,斑块越分散,越不利于抑制土壤侵蚀、径流等过程,从而造成污染元

素的流失,反之则可以降低其输出浓度。所以,长江流域中以森林占优势的流域内,大面积森林的团聚分布能较好的提高生态系统水质净化服务。综上,营养物质累积浓度的空间分布在不同景观类型上呈现出各不相同的特征,尤其在农业区域中。由于人类活动的影响造成流域中景观的异质性,而这种异质性造成不同汇水单元内的景观类型对水质的影响效果产生差异。现今有关这方面的研究开展极少,因此分析景观格局与水质净化服务关系时,就可能存在由于主导景观类型差异而导致对水质净化服务的降低和抵消,致使分析结果与实际存在偏差^[25]。本研究将具有相似优势景观特征的汇水单元聚类,再比较两者关系,对流域生态系统水质净化服务的保护和恢复更具有实际意义。

参考文献 (References):

- [1] Urban D L, O'Neill R V, Shugart H H Jr. Landscape ecology. *BioScience*, 1987, 37(2): 119-127.
- [2] 肖笃宁, 李秀珍. 当代景观生态学的进展和展望. *地理科学*, 1997, 17(4): 356-364.
- [3] Turner M G, Gardner R H, O'Neill R V. *Landscape Ecology in Theory and Practice*. New York: Springer, 2001.
- [4] Chaplin-Kramer R, Hamel P, Sharp R, et al. Landscape configuration is the primary driver of impacts on water quality associated with agricultural expansion. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(7): 074012.
- [5] 岳隽, 王仰麟, 李贵才, 吴健生. 基于水环境保护的流域景观格局优化理念初探. *地理科学进展*, 2007, 26(3): 38-46.
- [6] Dronova I. Environmental heterogeneity as a bridge between ecosystem service and visual quality objectives in management, planning and design. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 163: 90-106.
- [7] Xu H S, Zheng H, Chen X S, Ren Y F, Ouyang Z Y. Relationships between river water quality and landscape factors in Haihe River Basin, China: implications for environmental management. *Chinese Geographical Science*, 2016, 26(2): 197-207.
- [8] 唐艳凌, 章光新. 流域单元景观格局与农业非点源污染的关系. *生态学杂志*, 2009, 28(4): 740-746.
- [9] 罗璇, 史志华, 尹伟, 陈佳, 李璐, 伍世良. 小流域土地利用结构对氮素输出的影响. *环境科学*, 2010, 31(1): 58-62.
- [10] Amiri B J, Nakane K. Modeling the linkage between river water quality and landscape metrics in the Chugoku district of Japan. *Water Resources Management*, 2009, 23(5): 931-956.
- [11] Fennessy S, Craft C. Agricultural conservation practices increase wetland ecosystem services in the glaciated interior plains. *Ecological Applications*, 2011, 21(S1): S49-S64.
- [12] 欧洋. 密云水库上游流域多尺度景观与水质响应关系研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2011.
- [13] 张大伟, 李杨帆, 孙翔, 张方山, 朱红兴, 刘毅, 张英, 庄敏, 朱晓东. 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. *环境科学*, 2010, 31(8): 1775-1783.
- [14] 黄金良, 李青生, 洪华生, 林杰, 曲盟超. 九龙江流域土地利用/景观格局-水质的初步关联分析. *环境科学*, 2011, 32(1): 64-72.
- [15] Kearns F R, Kelly N M, Carter J L, Resh V H. A method for the use of landscape metrics in freshwater research and management. *Landscape Ecology*, 2005, 20(1): 113-125.
- [16] 赵鹏, 夏北成, 秦建桥, 赵华荣. 流域景观格局与河流水质的多变量相关分析. *生态学报*, 2012, 32(8): 2331-2341.
- [17] O'Neill R V, Krummel J R, Gardner R H, Sugihara G, Jackson B, DeAngelis D L, Milne B T, Turner M G, Zygmunt B, Christensen S W, Dale V H, Graham R L. Indices of landscape pattern. *Landscape Ecology*, 1988, 1(3): 153-162.
- [18] Collier K J. Linking multimetric and multivariate approaches to assess the ecological condition of streams. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, 157(1/4): 113-124.
- [19] 李秀珍, 布仁仓, 常禹, 胡远满, 问青春, 王绪高, 徐崇刚, 李月辉, 贺红仕. 景观格局指标对不同景观格局的反应. *生态学报*, 2004, 24(1): 123-134.
- [20] 陈进. 长江生态系统特征分析. *长江科学院院报*, 2015, 32(6): 1-6.
- [21] 张殿发, 王世杰, 李瑞玲. 土地利用/土地覆被变化对长江流域水环境的影响研究. *地域研究与开发*, 2003, 22(1): 69-72.
- [22] 李屹峰, 罗跃初, 刘纲, 欧阳志云, 郑华. 土地利用变化对生态系统服务功能的影响——以密云水库流域为例. *生态学报*, 2013, 33(3): 726-736.
- [23] 吴迎霞. 海河流域生态服务功能空间格局及其驱动机制[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [24] Qiu J X, Turner M G. Importance of landscape heterogeneity in sustaining hydrologic ecosystem services in an agricultural watershed. *Ecosphere*, 2015, 6(11): 1-19.
- [25] Riitters K H, O'Neill R V, Hunsaker C T, Wickham J D, Yankee D H, Timmins S P, Jones K B, Jackson B L. A factor analysis of landscape pattern and structure metrics. *Landscape Ecology*, 1995, 10(1): 23-39.
- [26] Doody D G, Withers P J A, Dils R M, McDowell R W, Smith V, McElarney Y R, Dunbar M, Daly D. Optimizing land use for the delivery of catchment ecosystem services. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2016, 14(6): 325-332.
- [27] 焦胜, 杨娜, 彭楷, 郭谌达, 李振民, 周怀宇. 汾河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.
- [28] 李艳利, 徐宗学, 李艳粉. 浑太河流域多尺度土地利用/景观格局与水质响应关系初步分析. *地球与环境*, 2012, 40(4): 573-583.
- [29] 郭青海, 马克明, 张易. 城市土地利用异质性与湖泊水质的影响. *生态学报*, 2009, 29(2): 776-787.