

引用格式:李洪庆,刘黎明,郑菲,等. 基于水环境质量控制的高集约化农业景观格局优化研究[J]. 资源科学, 2018, 40(1): 44-52. [Li H Q, Liu L M, Zheng F, et al. Agricultural landscape pattern optimization of high intensive agricultural area based on water quality control[J]. *Resources Science*, 2018, 40(1): 44-52.] DOI: 10.18402/resci.2018.01.05

基于水环境质量控制的高集约化农业 景观格局优化研究

李洪庆¹, 刘黎明², 郑菲¹, 赵姚阳¹

(1. 河海大学公共管理学院, 南京 210098; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要: 农业非点源污染治理已经成为制约高集约化农业区可持续发展的瓶颈之一。本文以洞庭湖高集约化农业区金井镇为案例, 在分析景观格局和水污染特点的基础上, 采用多元回归法建立景观格局指数与水环境质量季节关系模型, 基于模拟结果分别从景观格局优化、生活废水和固体废弃物处理、养殖业调控出发, 提出农业景观格局优化模式。评价结果表明: 优化后水环境质量提升, 总氮浓度控制在地表水环境质量最低标准内, 农业直接经济效益和生态系统服务价值均高于基准年。本文提出的模型构建方法不仅验证了景观格局与水环境质量关系, 也为农业景观格局优化提供依据, 其结果可为政府制定农业可持续发展、生态环境保护等提供科学依据。

关键词: 景观格局; 水环境质量; 回归模型; 综合评价

DOI: 10.18402/resci.2018.01.05

1 引言

农业非点源污染具有持续时间长、影响范围广和治理难度大的特点, 基于中国基本国情, 为了保障粮食安全和社会稳定, 尤其是高集约化农业区, 一段时间内仍需要投入大量的化肥与农药, 农业非点源污染依然是难以解决的环境问题之一。2017年中央1号文件提出推进农业清洁生产, 实现化肥农药零增长, 集中治理农业环境突出问题, 包括土壤污染修复、生态工程建设等, 更加明确了农业非点源污染治理的方向和决心。

随着农业污染问题的广泛关注, 研究深度与治理水平也在不断地提高, 包括环境污染识别与评价研究、机理研究、预测与控制研究等。污染治理主要从两个方面考虑, 一是通过生态和生物工程方法阻滞或消除污染, 例如多水塘系统^[1]、生态沟渠^[2]、人工湿地系统^[3,4]、生态控草^[5]、控虫技术^[6]等, 虽然为农业非点源污染控制做出了一定的贡献, 但是需要较

高的资金支持, 效益转化率较低, 缺乏推广性; 二是从规划、政策和经济等方向提出综合控制方法, 例如最佳管理措施制度^[7,8]、农业水交易税制度^[9]、生态补偿制度^[10,11]等, 此类方法效果稳定, 但是需要多因素配合才能发挥最大效用。

通过对景观数量、类型进行合理的空间配置与优化, 实现景观功能最大化是生态环境保护十分有效的途径之一。陈利顶等、孙然好等、黄宁等研究表明水环境质量与农业土地利用方式、景观格局具有一定的关系^[12-14]。Bu等、李明涛等、袁再健等运用不同方法构建了景观格局与水环境质量关系模型, 为评价、预测和管理水环境质量提供了依据^[15-17], 但是缺乏实际应用, 效果有待检验。因此本文通过分析高集约化农业景观格局和小流域水体污染特点, 构建景观格局与水环境质量关系, 依据参数属性, 从景观格局优化、农村生活废水与固体废弃物处理、养殖业调控三方面提出景观格局优化方案, 研

收稿日期 2017-05-26; 修订日期 2017-10-09

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(2015B13614); 国家自然科学基金重点项目(41130526)。

作者简介: 李洪庆, 男, 山东烟台人, 博士, 讲师, 主要研究方向为土地利用环境风险控制与景观生态。E-mail: lihongqing163@126.com

通讯作者: 刘黎明, E-mail: liulm@cau.edu.cn

2018年1月

究方法和结果可为农业非点源污染治理、水环境质量和农业区位规划提供科学依据。

2 案例区概况

本研究案例区为湖南省长沙市金井镇(27°55'N-28°40'N, 112°56'E-113°30'E)(图1),位于洞庭湖粮食主产区,面积为13 440hm²,其中耕地面积为2313hm²,地貌类型以丘陵为主,属于亚热带季风湿润气候,雨水较为集中,主要河流为金井河与脱甲河。金井镇是国家建设部小城镇建设试点镇,是长沙县工业强镇、农业重镇和商贸中心,融入长沙市“半小时经济圈”,2015年农民人均纯收入约为11 000元,农产品生产及加工主要为稻米、茶叶和蔬菜。

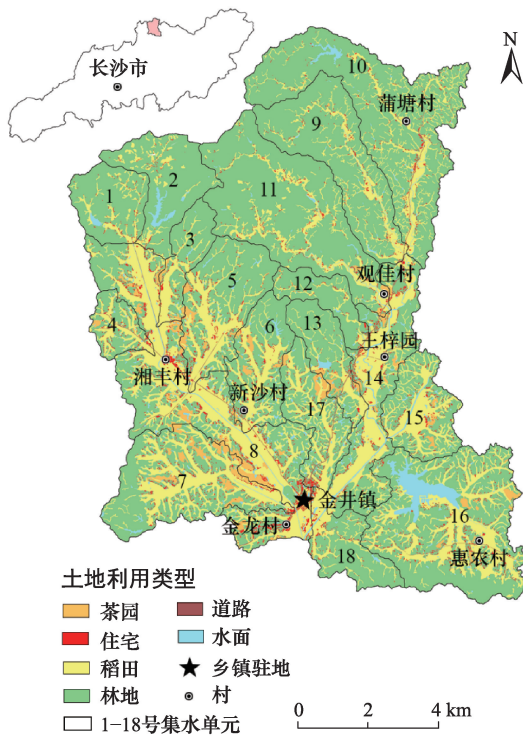


图1 金井镇土地利用现状及集水单元划分
Figure 1 Land use and sub-watershed of Jinjing Town

随着经济社会发展,金井镇面临新的机遇和挑战,一方面要求保持经济增长速度,积极发展特色产业;另一方面也面临着农业污染治理、农村环境整治、生态村镇建设等问题。金井镇旨在未来发展为4A级生态旅游镇,经济和生态环境之间需要相互配合,协调发展,制定合理的发展规划,有效的政策法规,因此本文基于水环境质量控制提出金井镇农业景观格局优化模式。

3 金井镇水污染特点分析

3.1 数据来源

本文中的数字高程模型(DEM)、坡度等地形数据是依据国家测绘局编制的1:5万地形图生成制得,土地利用现状图、水系图等数据资料来源于《金井镇土地利用总体规划图(2006—2020)(2012年修改)》^[18]。结合实地勘察,案例区共划分为18个集水单元(图1),2010—2012年每月固定时间在每个集水单元出水口采取水样。依据污染数据结果,本文选择硝态氮(NO₃⁻-N)、铵态氮(NH₄⁺-N)和总氮(TN)作为污染物评价指标。

3.2 水体污染特点及来源分析

金井镇属于典型的城郊高集约化农业模式,根据调研数据显示,年均纯氮使用量旱地约为252kg/hm²,水田约为285kg/hm²,严重超出了测土配方施肥标准,流域内大规模养殖场和家庭养殖户中部分粪便、废弃物直接排入河流,水体污染较为严重。其中耕地为主的3、8、14、16等集水单元水体TN浓度相对较高,土地利用风险较大,而以林地优势景观类型的2、9、11等集水单元水环境质量较好,在一定程度上证明了景观结构与水环境质量之间存在相关性。

依据杨姗姗、宋立芳等在案例区的实验结果^[19,20],参考郝芳华等、高学民等、钟振宇等对长江流域河流主要污染物来源的研究结果^[21-23],高集约化农业区水体污染物主要来源于农业,其次是农村生活废水与固体废弃物、养殖业。基于此金井镇水体污染物来源贡献率如表1。

表1 水体污染物来源贡献率
Table 1 Contribution rate of agricultural non-point pollution sources %

污染物类型	农业景观格局	农村生活废水与固体废弃物	养殖业
NO ₃ ⁻ -N	81	7	12
NH ₄ ⁺ -N	70	12	18
TN	81	7	12

4 景观格局与水环境质量关系模型构建

影响高集约化农业区水环境质量的因素十分复杂,但是在气候、自然资源等条件相对稳定的前提下,农业土地利用方式成为环境风险的主要影响因素。

4.1 确定空间尺度

确定空间尺度,即确定合理的研究单元。污染

物通过地表径流、地下淋溶等方式汇集到河流中,造成水体污染,因此景观构成及其与河流间的距离是影响水环境质量的 关键因素。作为污染物主要来源的农田、居民点大部分处于丘陵底部且沿河流分布,故以河流为中心,河流两侧 250m、500m 和 750m 距离构建缓冲区,其面积分别占总流域面积的 34%、57% 和 72%。在距离为 500m 的缓冲区内,面积比例已占稻田总面积的 75%、茶园的 47%、住宅的 73%,并且涵盖了稻田、茶园、林地、住宅、道路、水面等所有的景观类型,所以缓冲区距离分级设置合理。利用 SPSS 软件分析景观结构、布局与水环境质量的相关性,表 2 中只列出具有显著相关性的 4 种景观类型。

表2 不同缓冲区景观类型与水污染物浓度相关性系数分析
Table 2 Pearson's correlation coefficients between landscape types and water quality pollution in different buffer areas

缓冲区	污染物	Pearson 相关性系数			
		茶园	住宅	稻田	林地
整个流域	NO ₃ ⁻ -N	0.523*	0.599*	0.578*	-0.542*
	NH ₄ ⁺ -N	0.556*	0.691*	0.568*	-0.602*
	TN	0.568*	0.705**	0.612**	-0.626**
250m	NO ₃ ⁻ -N	0.407	0.668**	0.680**	-0.607**
	NH ₄ ⁺ -N	0.363	0.493*	0.583*	-0.631**
	TN	0.333	0.590*	0.632**	-0.645**
500m	NO ₃ ⁻ -N	0.447	0.639**	0.686**	-0.594*
	NH ₄ ⁺ -N	0.461	0.655**	0.615**	-0.651**
	TN	0.431	0.675**	0.665**	-0.663**
750m	NO ₃ ⁻ -N	0.473	0.675**	0.675**	-0.567*
	NH ₄ ⁺ -N	0.494*	0.726**	0.630**	-0.642**
	TN	0.482	0.758**	0.678**	-0.650**

注:**显著性水平为 0.01,*显著性水平为 0.05。

从景观结构分析,在景观生态学“源流汇”理论中,“源景观”对污染表现出正相关,而“汇景观”表现出负相关。依据相关性系数的正负值分析,茶园、住宅与稻田均表现出“源景观”特点,即对河流污染具有贡献作用,相反林地表现出“汇景观”特点,并且流域内林地面积越大,水环境质量越好,符合景观结构与水环境质量之间的关系表现。依据相关性分析结果茶园、住宅、稻田与林地将进入关系模型构建。

从景观格局分析,随着缓冲区距离的增加,4 种景观类型与河流污染物浓度相关性越来越大。距

离为 750m 时住宅、稻田、林地与污染物浓度显著性水平为 0.01,表现出高度相关性,当距离扩大到整个集水单元时,茶园也表现出显著相关性。结合实际情况,茶园对水体污染贡献率不可忽视,最终选择将集水单元作为空间尺度分析。

4.2 确定时间尺度

由于农业活动、气象因素等对河流水环境质量密切相关,因此本文按照季节规律分析(3、4、5 月为春季,以此类推)水体污染物浓度变化特征,并且尝试从季节尺度建立景观格局与水环境质量关系模型。

通过各个季节污染物输出浓度分析发现:在不同季节不同集水单元出现不同的情况。春季 NO₃⁻-N 浓度略大于 NH₄⁺-N,由于翻耕、大量施肥导致 NO₃⁻-N 输出浓度升高,但是春季各集水区 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 与 TN 浓度基本在国家地表水 V 级质量标准以内;夏秋两季由于亚硝化细菌与硝化细菌较为活跃,NO₃⁻-N 浓度占 TN 浓度比例较高,同时由于水流量增大,TN 输出浓度除了北部丘陵集水单元控制在标准以内,其他集水单元均超出最低标准;冬季 TN 构成中 NH₄⁺-N 远大于 NO₃⁻-N,主要原因是地表裸露、微生物不活跃、植被吸附功能降低、规模性养殖场增多、大量未经处理的养殖废水和生活污水排入河流,导致 TN 浓度急剧上升,远远超出了地表水环境质量最低标准。总体监测数据分析显示,流域内水体呈现高氮低磷的污染特点,综上由于自然和人类活动因素,每个季节水污染物浓度表现出不同的特点,因此采用季节为时间尺度分析景观格局与水环境质量关系。

4.3 景观格局与水环境质量关系模拟

景观格局指数是景观结构与格局的数量化表达,能够反映出一定的生态意义。不同景观类型面积比例(P)对水环境质量影响是不同的,2、9 集水单元林地组成面积较大,其污染物浓度明显偏低;最大斑块指数(LPI)有助于确定优势景观类型,河流下游的 8、14 集水单元耕地斑块面积最大,则优化农业景观格局时应重点调整耕地;斑块密度(PD)和边缘密度(ED)能够反映出景观破碎度和均匀度,一般景观越破碎、类型越复杂、斑块分布越零散,污染物输出越多^[24],例如 5、7 集水单元的茶园、住宅景观破碎化较重,耕地边缘密度大,说明污染源数量增多并且污

2018年1月

染物从耕地输出的范围变广,导致水环境质量差。因此本文选取上述4种景观格局指数作为自变量, NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、TN污染物浓度作为因变量,采用多元线性逐步回归法,模拟了景观格局指数与各污染物浓度在不同季节的关系模型,结果如表3所示。

表3 景观格局指数与水环境质量关系回归方程

Table 3 Regression equations for the water quality variables against the landscape metrics

污染物	季节	回归方程	R^2
NO_3^- -N	春季	$Y=1.161+11.178P_{\text{Res}}$	0.553
	夏季	$Y=0.703+1.753LPI_{\text{Res}}$	0.715
	秋季	$Y=0.260+0.006ED_{\text{Pad}}$	0.503
	冬季	$Y=1.019+0.018LPI_{\text{Pad}}$	0.488
NH_4^+ -N	春季	$Y=0.101+35.370P_{\text{Res}}$	0.652
	夏季	$Y=1.271+0.073LPI_{\text{Pad}}-0.013ED_{\text{For}}$	0.849
	秋季	$Y=0.187+0.184PD_{\text{Tea}}$	0.592
	冬季	$Y=2.536+1.159PD_{\text{Tea}}+6.604LPI_{\text{Res}}$	0.880
TN	春季	$Y=4.11-0.018LPI_{\text{For}}$	0.675
	夏季	$Y=2.874+0.148LPI_{\text{Pad}}-0.022ED_{\text{For}}$	0.881
	秋季	$Y=1.409+0.39PD_{\text{Tea}}$	0.643
	冬季	$Y=3.940+1.666PD_{\text{Tea}}+9.936LPI_{\text{Res}}$	0.823

注:Y表示污染物浓度,Tea表示茶园,Res表示住宅,Pad表示稻田,For表示林地

稻田、茶园、住宅和林地的景观格局指数均进入回归方程,并且贡献率(即系数的正负值)与“源流汇”理论相一致;总体拟合度 R^2 平均值为70%左右,表明景观格局指数能够解释大约70%的污染物浓度变化,与水体污染物来源贡献率分析相一致;关系模型中冬季回归方程常数依然较大,主要原因是冬季污染多来自于农村生活污水和养殖业废水排放,与景观格局关系较弱,结果与污染物季节分析特点相一致。

5 未来农业景观格局优化

金井镇在大力发展经济的同时,也注重生态环境保护,旨在未来大力发展生态人居和旅游观光,建设成为生态文明示范村镇,但是金井镇水环境质量并不乐观,所有集水单元河流断面TN浓度超出国家地表水V级标准,尤其是冬季污染情况更加严重。结合水体污染物来源分析,本文从农业景观格局优化、农村生活废水与固体废弃物处理和养殖业调控出发,综合制定未来发展模式,目标为将TN浓度控制在国家地表水环境质量最低标准之内,同时

保证农户农业收入不降低。

5.1 农业景观格局优化

依据景观格局与水环境质量关系模型, P_{Res} 、 LPI_{Res} 、 ED_{Pad} 、 LPI_{Pad} 指标进入 NO_3^- -N回归方程,因此控制 NO_3^- -N浓度时,可以考虑从流域内减少住宅面积、减少大范围连片居民点、减少稻田面积、进行土地整理等方法优化景观格局; P_{Res} 、 LPI_{Res} 、 LPI_{Pad} 、 ED_{For} 与 PD_{Tea} 进入 NH_4^+ -N回归方程,控制 NH_4^+ -N浓度时,可以通过减少住宅用地面积、合并茶园、增加林地面积等方法优化景观格局; LPI_{For} 、 ED_{For} 、 LPI_{Pad} 、 LPI_{Res} 和 PD_{Tea} 进入TN回归方程中,控制TN浓度时,可以增加林地面积和边缘长度、减少最大稻田斑块的面积、减少茶园破碎度等方法优化景观格局。

根据以上提出的方法,结合社会经济状况、土壤分布、土地利用现状、土地适宜性评价,有针对性地进行景观格局优化。主要内容包括:

(1)耕地。为了保证优质耕地,土壤类型为潜育型水稻土、坡度为1、2级(耕地坡度小于 6°)的耕地全部保留,种植双季稻;土壤类型为潜育型水稻土和淹育型水稻土是重点调整区域,其中坡度处于1、2级并且与其他耕地连片的尽量保留以提高最大斑块指数,坡度大于2级、宽度小于30m、并且分布在山谷的耕地(主要种植单季稻)退耕为林地;旱地依据退耕还林政策全部还林,以增加林地面积和边缘密度。

(2)茶园。茶业是金井镇特色产业,也是农户提升收入的主要途径。茶园将依据前几年扩张速度在土壤类型为酸性红壤、坡度低于 15° 的丘陵区原有茶园的基础上进行适当规模的增加,同时减少茶园破碎度。

(3)林地。北部丘陵区由于耕地相对较少,并且多为单季稻(缺水情况下种植玉米、红薯等旱作物),交通不便,大部分居民逐渐外迁,同时也是金井镇4个水库所在地和主要河流发源地。金井镇已将其规划为自然保护区,发展生态旅游产业链,旨在打造成中国中部地区集生态休闲旅游、运动娱乐、高端狩猎、生物种养科普和原生环境保育等功能为一体的“国际生态旅游度假区”。基于此并且考虑其生态环境功能的重要性,北部丘陵区将划为自然保护区,区域内所有耕地、农村宅基地还林,林地面积

大大增加,生态功能凸显。

(4)住宅。住宅用地主要分布在道路两侧600m范围内(约占80%),其他区域面积较小的住宅用地将逐渐遗弃。

(5)生态缓冲区。为了提升生态功能,在道路、河流两侧布局5m宽的植被缓冲带;散布在耕地中的坑塘水面面积增加5%变为湿地,连接沟渠和河流,作为污染物吸收降解缓冲区,主要植被为灌木和水生植物,相关文献显示其污染物去污效果可达到40%左右^[25-27]。

5.2 农村生活废水与固体废弃物处理

随着新型城镇化发展,金井镇积极治理村容村貌,优化农村生态环境,包括生活废水与固体废弃物回收处理、修建垃圾处理站等,取得了良好的效果。按照相关要求生活垃圾清运率和垃圾无公害处理率达到95%,农村生活污水处理率达到90%,但是实际调研中发现,环保工程主要集中在金井镇下游村落,在住宅较为分散的山区很难实施,生活废水以及固体废弃物依然随意排放,因此以主路两侧600m为界线,范围内农村生活污水及固体废弃物处理率达到90%,其他农户垃圾处理率为0。

5.3 养殖业调控

养殖业是农民收入的主要来源之一,尤其是冬季农闲期间,养猪现象十分普遍。在2010年金井镇共计出栏生猪大约24.52万头,由于没有形成规模化养殖和粪便污水集中处理,养殖业成为该流域水污染源之一。金井镇为了保护水源地和河流,将金井水库、军民水库、青山水库等周边陆域200m内范围划为禁养区,500m内为限养区,利用生态补偿的方式合理控制养殖业发展,同时要求其他区域养殖户必须进行废水粪便收集。因此依据区域内单位面积农田所能消纳的养殖废弃物计算出畜禽养殖环境承载力,采用畜禽养殖密度调控养殖数量,具体方法和数据可参考孟岑等的估算结果^[28]。鉴于养殖业是冬季污染主要来源,将采取严格的数量控制手段,集水单元1、2、9、10、11、12、13、16、18为禁养区,其他集水单元养殖密度控制在畜禽养殖环境承载力的1/3,金井镇年出栏量约为2.5万头。

5.4 农业景观格局模式

依据上述水环境质量提升方法,完成初步空间

格局优化、农村生活废水和固体废弃物处理、养殖业调控。将基准年污染物浓度依据表1分为三部分估算,其中农业景观格局优化部分,重新计算新的景观格局指数,将结果带入构建的回归模型中估算水污染物浓度;农村生活废水和固体废弃物处理按照处理率估算污染物浓度;养殖业调控按照出栏减少率估算污染物浓度,三部分污染物浓度相加计算出景观格局优化后不同季节污染物平均浓度,如果估算结果未满足地表水V级标准,再次对相应的集水单元进行景观格局优化调整,重新计算污染物浓度,直至满足要求,其最终农业景观格局优化如图2所示。



图2 农业景观格局优化布局

Figure 2 Optimal agricultural landscape pattern

6 农业景观格局优化生态环境效果分析

6.1 景观构成分析

景观结构变化如表4所示。林地面积增加至9971hm²,增加了13.33%,主要原因是北部丘陵区自然保护区的建立,这对于水源地保护、整个流域的水环境质量提升具有关键作用。为了有效降低农业非点源污染,耕地面积急剧减少了43%,主要原因是北部丘陵区退耕还林和河流中下游的土地整

2018年1月

表4 景观结构变化分析

Table 4 Comparative analysis of landscape composition (hm²)

景观类型	林地	耕地	茶园	住宅	河流	道路	水面	人工湿地和生态缓冲带
2010年	8 798	3 582	328	311	69	37	317	0
优化后	9 971	2 036	425	232	100	43	260	121

理。由于在设计时已经确保优质耕地面积不减少,依据调研数据双季稻产量每亩约为730kg,单季稻为450kg,土地整理后按照单产增加10%计算,稻谷总产量从3.2万t下降到2.5万t,降低了24.7%左右,但是其降低速度低于耕地减少速度,并且能够确保区域粮食安全,考虑到退耕还林政策和北部丘陵区生态移民实施效果,大范围耕地数量减少是可以实现的。为了增加农户收入,作为特色产业、经济价值较高的茶园适当增加。景观格局另一个重要变化是引入了人工湿地和生态缓冲区,共计121hm²,面积虽小但在污染物传输过程中起到了吸收和降解作用,同时也提升了生物多样性。

6.2 水环境质量分析

水环境质量控制作为景观格局优化的主要目的,始终贯穿整个过程,优化后水环境质量如图3所示,结果显示整个流域的水污染物季节平均浓度均低于基准年。

从季节对比分析,仍然呈现出一定的季节性,虽然采取了多种措施,但在冬季各种污染物浓度依然很高,说明冬季是控制污染的关键时期;从不同污染物浓度对比分析,优化后污染物浓度均降低,整个流域在不同季节水质均控制在地表水V级标

准之内,满足了设定要求。根据径流量估算出TN年负荷输出量将由每年431t降低为175t。综上所述新景观格局下水环境质量得到了有效的控制。

6.3 经济效益分析

在景观格局优化过程中虽然耕地面积、住宅面积、养殖规模都有所减少和降低,但是发展生态旅游提升了农户收入。据此估算未来农业经济效益达到4.44亿元,比2010年高12%左右,农民人均收入达4766元,而2010年只有3595元。依据生态系统服务价值评估体系测算,优化后生态效益高达20.33亿元,远高于直接农业价值,也高于2010年的18.25亿元,生态效益十分显著。因此在景观格局优化模式下不仅优化了水环境质量,而且提高了农业收益和生态服务价值,实现了经济与生态环境共同发展。

7 结论与讨论

本文以洞庭湖高集约化农业区金井镇为案例,分析了景观格局和水体污染特点,构建了农业景观格局与水环境质量回归关系模型,提出基于水环境质量控制景观格局优化模式,优化后景观格局发生相应变化,水环境质量提升,同时农业经济效益和生态系统服务价值增加,满足经济和生态环境协调发展。本文提出的景观格局优化模式能够为农

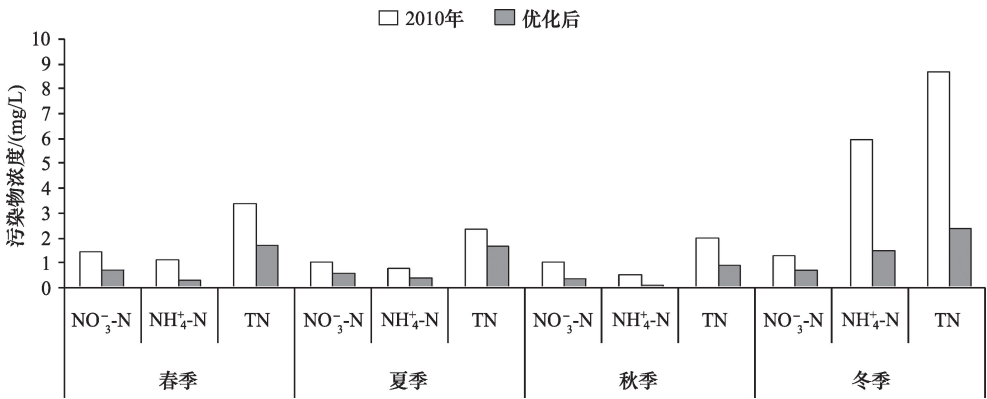


图3 水污染物季节平均浓度对比分析图

Figure 3 Comparative analysis of water pollutant average concentration by season

业规划、生态环境保护政策制定、自然资源管理提供科学依据。

影响水环境质量的因素很多,相关模型涉及大量的参数变量,例如水文、气候、土壤、地形等,考虑到在同一流域一定时期内景观格局、农户行为、自然条件等变化较小,本文从景观生态学角度出发,提出景观格局指数和污染物浓度回归模型构建方法。此方法数据容易获取,方法相对简单,能够合理地评价和预测水环境质量,适用于自然环境相对稳定的小流域地区。

虽然本文通过回归方程构建了景观格局与水环境质量关系,但是由于案例区为小流域,污染采样点位相对较少,对模型模拟精确性具有一定的影响。在景观格局优化过程中,丘陵区质量较差的耕地全部退耕还林,导致耕地面积急剧减少,粮食总产量下降较多,在其他粮食主产区或者耕地较少的地区实现难度较大,操作上具有一定的限制性,同时提出的土地整理措施,实际中面临权属问题、资金问题等,有待在实践中进一步完善。

参考文献(References):

- [1] Guittonny-Philippe A, Masotti V, Hohener P, et al. Constructed wetlands to reduce metal pollution from industrial catchments in aquatic Mediterranean ecosystems: A review to overcome obstacles and suggest potential solutions[J]. *Environment International*, 2014, 64(3): 1-16.
- [2] 陈永高, 张瑞斌. 太湖流域河网水体生态修复工程及其效果[J]. 水土保持通报, 2015, 35(6): 192-195. [Chen Y G, Zhang R B. Ecological restoration engineering and its effects of river network in Taihu Lake Basin[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(6): 192-195.]
- [3] Zhao T, Xu H, He Y, et al. Agricultural non-point nitrogen pollution control function of different vegetation types in riparian wetlands: a case study in the Yellow River wetland in China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(7): 933-939.
- [4] 万博阳, 王全金, 戚晓波. 多级人工湿地-塘组合系统去除污染物研究[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(3): 25-29. [Wan B Y, Wang Q J, Qi X B. Multi-stage constructed wetland-pond system to remove contaminants[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2017, 34(3): 25-29.]
- [5] 何秋虹, 杨知建, 肖润林. 农田生态控草技术研究进展[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2009, 35(1): 59-63. [He Q H, Yang Z J, Xiao R L. Review of studies on weed ecological control of farmland[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Science)*, 2009, 35(1): 59-63.]
- [6] Lou Y G, Zhang G R, Zhang W Q, et al. Reprint of: biological control of rice insect pests in China[J]. *Biological Control*, 2014, 68(1): 103-116.
- [7] Haas M B, Guse B, Fohrer N. Assessing the impacts of best management practices on nitrate pollution in an agricultural dominated lowland catchment considering environmental protection versus economic development[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 196: 347-364.
- [8] 孙平, 周源伟, 华新, 等. 三峡库区面源污染防控 BMPs 框架体系研究[J]. 水生态学杂志, 2017, 38(1): 54-60. [Sun P, Zhou Y W, Hua X, et al. BMP framework for nonpoint source pollution control in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Journal of Hydroecology*, 2017, 38(1): 54-60.]
- [9] Mariola M J. Farmers, trust, and the market solution to water pollution: The role of social embeddedness in water quality trading[J]. *Journal of Rural Studies*, 2012, 28(4): 577-589.
- [10] 胡蓉, 吴会磊, 张一心, 等. 湖北大冶镉污染稻田种植模式调整的生态补偿研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(1): 214-220. [Hu R, Wu H L, Zhang Y X, et al. Ecological compensation research on plantation structure adjustment for paddy fields contaminated by Cadmium in Daye, Hubei Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(1): 214-220.]
- [11] 蔡银莺, 余亮亮. 重点开发区域农田生态补偿的农户受偿意愿分析-武汉市的例证[J]. 资源科学, 2014, 36(8): 1660-1669. [Cai Y Y, Yu L L. Ecological compensation for agricultural land in the key development area of Wuhan based on the willingness of farmers[J]. *Resources Science*, 2014, 36(8): 1660-1669.]
- [12] 陈利顶, 傅伯杰, 徐建英, 等. 基于“源-汇”生态过程的景观格局识别方法-景观空间负荷对比指数[J]. 生态学报, 2003, 23(11): 2406-2413. [Chen L D, Fu B J, Xu J Y, et al. Location-weighted landscape contrast index: a scale independent approach for landscape pattern evaluation based on “source-sink” ecological processes[J]. *Acta ecologica sinica*, 2003, 23(11): 2406-2413.]
- [13] 孙然好, 陈利顶, 王伟, 等. 基于“源”“汇”景观格局指数的海河流域总氮流失评价[J]. 环境科学, 2012, 33(6): 1784-1788. [Sun R H, Chen L D, Wang W, et al. Correlating landscape pattern with total nitrogen concentration using a location-weighted sink-source landscape index in the Haihe River Basin, China[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(6): 1784-1788.]
- [14] 黄宁, 王红映, 吝涛, 等. 基于“源-汇”理论的流域非点源污染控制景观格局调控框架-以厦门市马銮湾流域为例[J]. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3325-3334. [Huang N, Wang H Y, Lin T, et al. Regulation framework of watershed landscape pattern for

2018年1月

- non-point source pollution control based on "source-sink" theory: a case study in the watershed of Maluan Bay, Xiamen City, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(10): 3325-3334.]
- [15] 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(3): 187-197.
- [16] 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[J]. 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 Chaohe River Watershed [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(8): 2296-2306.]
- [17] 袁再健, 孙倩. 海河流域大清河土石山区不同空间尺度水沙关系分析[J]. 资源科学, 2016, 38(4): 750-757. [Yuan Z J, Sun Q. Runoff-sediment relationship for various spatial scales in the Daqinghe rocky mountainous area[J]. *Resources Science*, 2016, 38(4): 750-757.]
- [18] 长沙县国土资源局. 金井镇土地利用总体规划图(2006-2020)(2012年修改) [EB/OL]. (2014-04-04)[2017-05-01]. http://www.csx.gov.cn/gtzy/gtzyyw/ghjh/tdlygh/201404/t20140421_651394.html. [Changsha County Municipal Bureau of Land and Resources. Jinjing Town General Land Use Planning (2006-2020)(2012 edition) [EB/OL]. (2014-04-04)[2017-05-01]. http://www.csx.gov.cn/gtzy/gtzyyw/ghjh/tdlygh/201404/t20140421_651394.html.]
- [19] 杨姗姗. 城郊区小流域水体氮磷输出特征及其影响因素[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011. [Yang S S. Influencing Factors of Nitrogen and Phosphorus Output in Suburban Area of Small Watershed [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011.]
- [20] 宋立芳. 长沙县金井镇流域氮磷养分输出特征以及影响因素[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014. [Song L F. Characteristics and Influencing Factors of Nitrogen and Phosphorus Export in the Jinjing Town in Changsha County[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014.]
- [21] 郝芳华, 程红光, 杨胜天. 非点源污染模型-理论方法与应用[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006. [Hao F H, Cheng H G, Yang S T. Non-Point Source Pollution Model- Theory and Apply [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2006.]
- [22] 高学民, 陈静生, 王立新. BP网络应用于长江水质研究[J]. 环境科学研究, 2001, 14(1): 49-52. [Gao X M, Chen J S, Wang L X. Applying BP neural network to study water quality of the Yangtze River[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2001, 14(1): 49-52.]
- [23] 钟振宇, 陈灿, 万斯. 洞庭湖污染状况及防治对策[J]. 湖南有色金属, 2011, 27(4): 64-67. [Zhong Z Y, Chen C, Wan S. The pollution status and control measures for Dongting Lake[J]. *Hunan Non-ferrous Metals*, 2011, 27(4): 64-67.]
- [24] Umass landscape ecology lab. Fragstats: spatial pattern analysis program for categorical maps documentation[EB/OL]. (2015-04-21)[2017-05-01]. http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/faq/fragstats_faq.
- [25] 张树楠, 肖润林, 余红兵, 等. 水生植物刈割对生态沟渠中氮、磷拦截的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(8): 1066-1071. [Zhang S N, Xiao R L, Yu H B, *et al.* Effects of cutting aquatic plants on nitrogen and phosphorus interception in ecological ditches [J]. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2012, 20(8): 1066-1071.]
- [26] 余红兵, 肖润林, 杨知建, 等. 灌溉和降雨条件下生态沟渠氮、磷输出特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(5): 686-692. [Yu H B, Xiao R L, Yang Z J, *et al.* Study on the characteristics of nitrogen and phosphorus transportation through ecological ditch during irrigation and rainfall[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(5): 686-692.]
- [27] 张树楠, 肖润林, 刘锋, 等. 生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应[J]. 环境科学, 2015, 36(12): 4516-4522. [Zhang S N, Xiao R L, Liu F, *et al.* Interception effect of vegetated drainage ditch on nitrogen and phosphorus from drainage ditches[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(12): 4516-4522.]
- [28] 孟岑, 李裕元, 徐晓光, 等. 亚热带流域氮磷排放与养殖业环境承载力实例研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(2): 635-643. [Meng C, Li Y Y, Xu X G, *et al.* A case study on non-point source pollution and environmental carrying capacity of animal raising industry in subtropical watershed [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(2): 635-643.]

Agricultural landscape pattern optimization of high intensive agricultural areas based on water quality control

LI Hongqing¹, LIU Liming², ZHENG Fei¹, ZHAO Yaoyang¹

(1. College of public administration, Hohai university, Nanjing 210098, China;

2. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Agricultural non-point source pollution control has become a bottleneck for sustainable development especially in high intensive agricultural areas in China. Therefore, maintaining economic growth along with water quality improvements is a great challenge for policymakers. Taking Jinjing Town as a case study, we first analyzed water quality dynamics at spatial and temporal scales based on pollution monitoring data. Then, three different width buffer areas along the river were drawn to analyze the correlation between landscape pattern and water quality pollutions according to Pearson's correlation coefficient analysis; catchment was chosen as the suitable scale, and four landscape types forest, tea garden, paddy land and residential were chosen as major landscape parameters. A multiple regression analysis model was adopted to build the relationship between landscape pattern characteristics and water quality pollution for NO_3^- -N, NH_4^+ -N and TN for each season. According to the results, we designed agricultural landscape pattern modes from three aspects, one is landscape pattern optimization by changing land use types, shape and area; another is raising sanitary wastewater and solid waste treatment rate; and the third is livestock industry adjustment by livestock amount control. The assessment results show that water quality improves effectively and nitrogen pollutant concentration meets level V of environmental quality standards for surface water in the new landscape scenario. Biodiversity benefits, agricultural economic value, ecosystem service value and household net agricultural income are higher than in 2010. The relationship model method proposed here not only verifies the relationship between landscape pattern and water quality, but supports landscape pattern design. These landscape pattern optimization results will assist agricultural sustainable development and environmental protection planning for decision-makers.

Key words: landscape pattern; water quality; Regression Model; integrated assessment