

平原河网地区非点源污染风险差异化分区防控研究^{*1}

付永虎^{1,2} 刘黎明^{2*} 任国平² 刘朝旭² 郭赞² 叶津炜²

(1. 淮海工学院法学院, 江苏 连云港 222005;

2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

【摘要】: 土地利用优化和空间防控策略对非点源污染风险控制及水环境质量的改善具有重要意义。本文以太湖流域典型平原河网地区-上海市青浦区为研究对象, 将灰色线性规划模型与最小累积阻力模型相结合, 以控制非点源污染风险和增加经济效益、生态效益为目标, 进行土地利用结构优化与空间分区防控研究, 在空间上划设了水资源保育区、水资源重点防护区、非点源污染一般阻控区、非点源污染中等阻控区及非点源污染重点阻控区, 并针对不同分区提出具有针对性的防控措施。与 2012 年相比, 预测 2020 年优化防控方案下, 可减少总氮、总磷的输出 10.96% 和 41.33%。由此表明, 优化土地利用结构和构建空间差异化防控机制是有效调控非点源污染风险, 实现区域可持续土地利用, 促进经济发展和保证生态环境安全的有效途径。

【关键词】: 非点源污染; 灰色线性规划; 最小累积阻力模型; 差异化分区防控; 青浦区

【中图分类号】: F301.21; X32 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2017)05-0713-10

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201705008

当前, 随着水环境问题的日益突出及点源污染控制水平的逐步提高, 区域非点源污染尤其是农业和农村生活引起的非点源污染是当今水环境恶化的主要污染源, 同时也是当前水污染控制研究的难点^[1]。非点源污染风险控制已成为世界各国环境保护与治理的热点问题之一。非点源污染的形成与土地利用结构和景观格局等因素关系密切, 土地利用方式、土地利用结构和景观格局的差异, 直接导致了非点源污染物输出量、迁移特征与区域生态系统调节机制的不同^[2]。人类不合理的土地利用活动是非点源污染发生的根本原因。从生态系统的角度来说, 人类为追求经济效益最大化, 对陆表生态系统进行了重构与改造, 改变了物质的输出、迁移方式, 打破了区域生态系统的平衡, 从而提高了非点源污染发生的风险。

目前, 非点源污染的控制和管理主要通过采取各种“最佳管理措施”(Best management practices, BMPs)来实现^[3,4]。例如, 针对三峡库区蓄水后香溪河水体富营养化趋于严重的问题, Strehmel 等^[5]借助 SWAT 模型, 进行肥料减量化与保护性耕作措施的非点源污染评估。研究结果表明耕作措施对土壤侵蚀和磷的流失具有重要影响; 为减少磷污染输出负荷, 梯田的建设与保持比减少肥料更为有效。Zhang 等^[6]以北京市密云水库上游流域为研究区, 应用 CLUE-S 和 SWAT 耦合模型进行不同土地利用情景下的

¹ 收稿日期: 2016-11-05; 修回日期: 2017-01-12

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41130526) [National Natural Science Foundation (41130526)]; 淮海工学院科研基金资助项目(S2016005) [Huaihai Institute of Technology Research Fund (S2016005)]

作者简介: 付永虎(1982~), 男, 博士, 主要从事土地资源可持续利用方面研究. E-mail: huhu_0902@163.com

***通讯作者** E-mail: liulm@cau.edu.cn

污染负荷评估,通过在河岸带建立植被缓冲带、坡耕地的退耕还林等措施,可显著降低氮磷污染输出负荷,从而实现对农业非点源污染的有效控制。近年来随着景观生态学的发展,其以强调空间格局、生态过程与尺度的交互作用,将人类活动同生态系统结构与功能耦合分析等优势,在非点源污染空间优化领域得到了快速的发展^[7]。例如,Seppelt 等^[8]基于动态空间显性生态模拟模型,对农区景观格局与营养盐流失进行模拟,提出了农区景观格局优化的途径。石燕璐^[9]以江苏省宜兴市为例,运用最小耗费距离模型,以水质保护为目标确定了案例区植被缓冲区的最佳生态位置。以上研究表明,在宏观层面进行区域土地利用结构优化和空间布局是控制非点源污染的有效途径^[10]。然而,纵观上述研究其在考虑各景观类型的生态过程强弱的差异上,多为凭借主观经验,很少从景观类型的污染物输出特性来识别非点源污染的“源”、“汇”风险格局。此外,从区域土地结构优化与景观生态安全格局分区调控相结合的研究视角更鲜有报道。基于此,本文首先从区域土地利用结构优化的角度,运用灰色线性规划方法对非点源污染约束条件下的土地利用结构进行优化;然后依据景观生态学“源”、“汇”理论,采用最小累积阻力模型,对研究区土地利用空间布局进行分析,进而提出具有针对性的分区防控措施,以期现实非点源污染风险的有效控制。

1 方法与模型

1.1 研究区概况

本文选取上海市青浦区作为研究单元,该区域位于上海市西郊,太湖下游,黄浦江上游。地理坐标为 $30^{\circ} 59' \sim 31^{\circ} 16' N$ 、 $120^{\circ} 53' \sim 121^{\circ} 17' E$,土地总面积约 670.14 km^2 ,占上海市总面积的 10%,境内地势平坦,河网密集,水面率达 16.65%。极密的河网分布和较大的水域面积,使得水环境较容易接受来自外界的各种污染物。淀山湖为上海市主要水源地之一,承担了全市近 50% 的饮用水供给量。为确保水源地水环境质量,青浦区执行了严格的地表水环境标准,特别是淀山湖地区,当地的工业和畜牧养殖业的发展受到限制,形成了以种植业和水产养殖业为主的农业产业结构。近年来,青浦区非点源污染风险防控日益受到重视,尤其是随着高集约化农业生产模式的推广,加剧了氮、磷等养分的流失。农业非点源污染已成为青浦区、特别是淀山湖地区水体富营养化和水质恶化的重要原因。

1.2 数量优化

1.2.1 研究方法

本文采用灰色线性规划方法,以青浦区 2012 年 1:50 000 土地利用图作为土地利用现状分类的基础,结合青浦区土地资源特点以及土地利用规划的要求,进行土地利用结构的数量优化。以 2012 年为基期,规划目标年为 2020 年,设置 9 个决策变量:耕地 X_1 (包含旱地 X_{1a} 和水田 X_{1b})、园地 X_2 、林地 X_3 、养殖水面 X_4 、其它农用地 X_5 、农村居民点用地 X_6 、城镇用地 X_7 、交通运输用地 X_8 、水域(养殖水面除外)及水利设施用地 X_9 。

1.2.2 约束条件

约束条件主要考虑与土地利用密切相关的土地资源、社会需求和生态环境要素等 3 方面。根据研究需要,其设置应满足总量约束、青浦区宏观规划约束、生态环境约束、粮食安全约束及非负约束(表 1)。

表 1 土地利用结构优化约束因子及其表达式和参数取值

Tab.1 Constraint Factor, and Its Expression, Parameter Values of Land-use Structure Optimization

约束因子	约束因子表达式	计算公式或参数取值	参考依据及数据来源
土地总面积约束	$X_1+X_2+X_3+X_4+X_5+X_6+X_7+X_8+X_9=66\ 977.00\ \text{hm}^2$	各类用地面积之和等于土地总面积。	各类用地面积与土地总面积：青浦区2012年1:50 000土地利用现状图；土地利用类型划分参考《全国土地分类(过渡时期)》。
总人口总量约束	$8.60 \times (X_1+X_2+X_3+X_4+X_5+X_6)+74.64X_7 \leq 1\ 781\ 311$	2012年青浦区农村用地和城镇用地人口密度分别为8.60人/hm ² 和74.64人/hm ² ，2020年：采用离散型灰色预测模型DGM(1, 1)预测2020年人口总量为1 781 311人*。	2012年青浦区农村和城镇人口密度：《青浦区统计年鉴，2013》青浦区土地承载人口数不应超过规划期目标年预测人口数。
耕地保有量、水稻面积、鱼塘面积、建设用地总规模、城镇建设规划用地、农村居民点用地、骨干水系面积	$X_{1a}+X_{1b} \geq 23\ 711.00\ \text{hm}^2$; $X_{1b} \geq 11\ 000.00\ \text{hm}^2$; $X^2 \geq 877.75\ \text{hm}^2$; $X^3 \geq 5\ 789.60\ \text{hm}^2$; $X^4 \geq 3\ 666.67\ \text{hm}^2$; $X^5 \geq 759.11\ \text{hm}^2$; $15\ 158.82\ \text{hm}^2 \leq X_6+X_7 \leq 22\ 800.00\ \text{hm}^2$; $X_6=820.00\ \text{hm}^2$; $X_8 \geq 3\ 162.20\ \text{hm}^2$; $12\ 963.63\ \text{hm}^2 \leq X_9 \leq 13\ 170.00\ \text{hm}^2$	2020年青浦区耕地保有量不少于23 711.00 hm ² 。为保障农产品的持续供给，按照上海市政府下达的控制指标，水稻面积不低于11 000 hm ² 、鱼塘面积不少于3 666.67 hm ² 。建设用地总规模控制在22 800.00 hm ² 以内，其中城镇建设用地不超过21 980.00 hm ² 、农村居民点用地为820.00 hm ² ，骨干水系不低于13 170 hm ² 。	依据《青浦区土地利用总体规划(2010—2020年)》、《青浦区区域总体规划实施方案(2006—2020)》、《上海市青浦区土地资源利用和土地资源保护“十二五”规划》、《青浦区现代农业发展战略与产业化行动计划研究-青浦农业“十一五”计划和2020年规划》和《上海市青浦区农业发展“十二五”规划》。
粮食安全约束	$X_{1b} \geq 8\ 504.74\ \text{hm}^2$	$X_{1b} \geq S \times P/a$ S为2020年DGM(1, 1)预测的人均粮食需求量，52.82 kg/人·年。P为2020年DGM(1, 1)预测的人口数，1 781 311人。a为2020年粮食单产，为10 950 kg/hm ² ·a。	S：依据2000~2012年人均粮食消费量，采用DGM(1, 1)模型进行预测*，2000~2012年人均粮食消费量：《青浦区统计年鉴，2001-2013年》；a：2020年粮食单产，根据实地调研并结合专家经验，综合考虑目标年农技推广水平及水稻、小麦的增产潜力，同时根据青浦区农业布局规划，到2020年粮食生产实现“三三制”的种植模式，即春季粮食作物的种植制度实现小麦、绿肥、休闲各占粮食播种面积的1/3基于此将粮食单产设为10 950 kg/hm ² ·a。
环境约束	$55.65X_{1a}+42.19X_{1b}+10.05X_2+8.10X_3+22.78X_4+77.19X_6 \leq 1\ 543\ 082$; $3.5X_{1a}+2.9X_{1b}+0.58X_2+0.41X_3+4.03X_4+23.5X_6 \leq 193\ 152.5$	区域总氮(TN)、总磷(TP)输出量应小于现状流失量。TN输出系数： $X_{1a}=55.65$ ； $X_{1b}=42.19$ ； $X_2=10.05$ ； $X_3=8.10$ ； $X_4=22.78$ ； $X_6=77.19$ 。TP输出系数： $X_{1a}=3.5$ ； $X_{1b}=2.9$ ； $X_2=0.58$ ； $X_3=0.41$ ； $4.03X_4=4.03$ ； $X_6=23.5$ 。	X相关TN、TP输出系数参考自：钱晓雍等 ^[11] ，2011；王寿兵等 ^[12] ，2013；Zhao Zheng et.al ^[13] ，2014；石燕璐 ^[9] ，2011；钱晓雍 ^[14] ，2011。
决策变量非负约束	$X_1, X_2, \dots, X_9 \geq 0$	灰色线性规划模型中所有的变量不能取负值	

注：表1中*为基于灰色系统理论建模软件GTMS3.0应用离散型灰色模型DGM(1, 1)分别预测了青浦区规划目标年2020年的人口总量、人均粮食需求量与粮食生产效益。经平均相对误差检验，青浦区人口总量、人均粮食需求量和粮食生产效益的DGM(1, 1)模型平均相对误差 $\alpha < 0.01$ ，根据灰色模型精度检验等级划分标准，本模型预测精度为1级，可用于预测^[15]。

1.2.3 目标函数的构建

(1) 生态环境效益最大化

以单位面积上各土地利用类型的生态系统服务价值作为变量系数，建立基于生态系统服务价值的生态环境效益最大化的目标函数。本文以谢高地等^[16]生态服务价值当量因子算法为基础，依据青浦区 2012 年统计数据，计算研究区不同生态系统的净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)，进而对生态系统服务价值当量因子表进行了本地化修正和补充。关于 1 个标准单位生态系统服务价值当量因子的确定问题，鉴于区域尺度实际应用中无法完全消除人为因素的干扰以准确衡量农田生态系统自然条件下能够提供的粮食产量的经济价值，本文参考谢高地等^[16]的处理方法，将单位面积农田生态系统粮食生产的净利润作为 1 个标准当量因子的生态系统服务价值量。依据 2000~2012 年粮食生产效益的历史序列数据，并以 2000 年不变价，采用 DGM(1, 1) 模型预测青浦区 2020 年单位面积农田生态系统粮食生产的净利润(1 个标准当量因子的价值量)为 6 000 元/hm²·a。水产养殖生态系统单位面积生态服务价值取值为 475 000 元/hm²·a^[17]。此外，为了便于目标函数的构建，非农建设用地生态系统服务价值取 1^[18]，从而得到青浦区不同类型生态系统服务价值系数(表 2)。

表 2 青浦区各生态系统单位面积生态系统服务价值(元/hm²·a)

Tab.2 Ecosystem Service Value per Unit Value of Qingpu District Ecosystem(yuan/hm²·a)

用地类型	旱地X _{1a}	水田X _{1b}	园地X ₂	林地X ₃	养殖水面X ₄	河流/湖泊X ₉
价值系数	49 560	26 580	89 430	114 810	475 000	506 088

目标函数确定为：

$$\text{Max}f_1(X)=49560X_{1a}+26580X_{1b}+89430X_2+114810X_3+475000X_4+X_5+X_6+X_7+X_8+506088X_9$$

(2) 经济效益最大化

利用 2000~2012 年青浦区相关统计数据及农户调研数据，采用离散型灰色预测模型 DGM(1, 1) 预测不同土地利用类型的经济效益。其中，城镇用地和交通运输用地依据《上海市青浦区土地资源利用和土地资源保护“十二五”规划》土地集约利用调控指标，假设 2020 年单位建设用地产出水平在 2015 年的基础上提高 30%，达到 2 470 000 元/hm²。其目标函数确定为：

$$\text{Max}f_2(X)=30600X_{1a}+11400X_{1b}+20400X_2+1740X_3+34223X_4+19673X_5+19673X_6+2470000X_7+2470000X_8+900X_9$$

(3) 综合效益最大化

根据不同利益相关者偏好以及专家知识对土地利用效益权重进行确定。本文组织了青浦区不同利益相关者群体(学者、政府官员、农技推广人员及农户)对土地利用效益的各个方面的重要程度进行了讨论，最终将生态效益和经济效益权重分别设定为

0.45 和 0.55。因此，目标函数确定为：

$$\text{Max}f_3(X)=0.45\text{max}f_1(X)+0.55\text{max}f_2(X)$$

1.3 土地利用分区防控方案

1.3.1 空间分区模型

(1) 最小累积阻力模型

最小累积阻力模型(Minimum Cumulative Resistance, MCR)是指物种从“源”到目的地运行过程中所耗费的代价，其最早由 Knaapen 等人于 20 世纪 90 年代提出，然后由俞孔坚等人将该模型引入国内物种迁移、生物多样性保护、城乡规划等领域，进行了大量应用研究并取得了良好的效果^[19, 20]。其基本公式如下：

$$MCR = f_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} D_{ij} \times R_i \quad (1)$$

式中： MCR 为最小累积阻力值； f 为 1 个最小累积阻力与生态过程正相关性的函数； $\min$ 为不同途径取累积最小值； D_{ij} 为物种从源 j 到景观单元 i 的空间距离； R_i 为单元 i 对某物种运动的阻力系数，表示每个单元对于某种物体或现象运动通过时的摩擦系数，其值的高低代表通过的难易程度； Σ 为单元 i 与源 j 之间穿越所有单元的距离和阻力的累积。模型的计算通过 Arcgis10.1 中 Spatial Analyst 模块中的 Cost Distance 功能实现。

(2) 空间分区方法

为实现生态效益最大的同时有效调控非点源污染物的迁移，以生态用地扩张和非点源污染物扩张 2 个过程的最小累积阻力差值作为土地利用空间分区的主要依据。其公式如下：

$$MCR_{\text{差值}} = MCR_{\text{生态用地扩张}} - MCR_{\text{非点源污染物迁移}} \quad (2)$$

当 $MCR_{\text{差值}}=0$ 时，表示为 2 个过程最小累积阻力值相等，是生态用地和非点源污染物扩张用地之间的分界线；当被评价单元 $MCR_{\text{差值}}<0$ 时，为水资源保育与防护区域；当 $MCR_{\text{差值}}>0$ 时，是非点源污染物迁移的重点防控区域，需设计缓冲带以防止因非点源污染物的迁移而引发的环境污染。

1.3.2 参数设置

(1) “源”地的确定

在 MCR 模型中，“源”是物流和能流的主要集散地，对周围土地具有辐射作用，辐射能力随距离增加而减弱，即成本随距离逐渐增大。根据景观生态学“源”、“汇”理论，生态用地扩张过程中，“源”主要为淀山湖及其它湖泊。非点源污染的发生机制源于“源”景观的土壤养分通过其它景观向“汇”景观的迁移，基于上文土地利用非点源污染输出负荷的结果，将最大养分输出负荷的土地利用类型(农村居民点)确定为“源”。

(2) 阻力系数的设定

准确量化不同土地利用类型的阻力系数是 MCR 模型的关键。将区域土地利用类型分为 2 类，即以湖泊等生态用地保护和以农村居民点等非点源污染物迁移的土地利用类型。针对生态用地保护与扩张的阻力系数设定问题，以各土地利用类型的生态系统服务价值为基础，同时参考已有研究成果作为赋值标准。生态系统服务功能是衡量不同景观生态功能的重要依据，土地利用类型的单位系统服务价值越高，生态功能越完善，生态流在其中就愈发顺畅，阻力系数就越低^[21]。由于景观空间的异质性，非点源污染物迁移的过程中会受到不同的阻力，其阻力大小随土地单元的类型而异，同一土地单元对于不同的扩张过程分别起着阻碍或促进作用^[22]。因此，针对非点源污染的阻力系数设定问题，本文主要考虑不同土地利用类型对“源”营养物质的迁移阻力。众所周知，影响氮磷养分迁移的因素有很多，然而鉴于青浦区主要的土壤类型是水稻土，占耕地总面积的 99.2%，地势平坦、河网密集等实际情况，各土地利用类型对农村居民点的阻力值可以根据土地利用类型的氮磷输出负荷确定。污染物输出负荷越高的土地利用类型对非点源污染物迁移起促进作用，污染物输出负荷越高其阻力越小，非点源污染风险越大；污染物输出负荷越小的土地利用类型对非点源污染物迁移起阻碍作用，污染物输出负荷越小其阻力越大，非点源污染风险则越小。为便于计算，本文将非点源污染输出负荷最高的农村居民点污染物的阻力系数设为 1。针对其他土地利用类型阻力系数的赋值，首先采用离差标准化法使原始数据映射到[0 - 1]之间，然后根据输出负荷越高则阻力系数小，通过 1 与离差标准化后数据的差值得到其他土地利用类型的阻力系数。具体方法如下：

$$R_i = \left(1 - \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \right) \times 100 \quad (3)$$

式中： R_i 为土地利用类型 i 对农村居民点氮或磷迁移的阻力系数； x_i 为土地利用类型 i 的非点源污染输出负荷； $x_{\min}$ 为所有土地利用类型非点源污染输出负荷最小值； $x_{\max}$ 为所有土地利用类型非点源污染输出负荷最大值。根据公式(3)得到各土地利用类型的 TN 阻力系数和 TP 阻力系数(表 3)。

表 3 研究区不同土地利用类型阻力因子及阻力系数

Tab.3 Resistance Factor and Resistance Coefficient of Land-use Types

土地 利用类型	TN迁移 阻力系数	TP迁移 阻力系数	生态用地 扩张阻力系数
农村居民点	1	1	95
养殖水面	71	83	65
城镇用地	46	69	100
旱地	29	86	55
水田	46	88	55
园地	88	98	40
交通用地	94	100	90
其它农用地	88	98	55
林地	94	100	20
湖泊	100	100	1

2 结果与分析

2.1 土地利用结构优化方案

依据上述目标函数和约束条件,利用 LINGO11 软件进行求解,得到非点源污染控制下青浦区综合效益最大的土地利用结构优化方案(表 4)。2020 年青浦区水田、养殖水面、其他农用地、农村居民点用地处于减少状态,其中养殖水面、农村居民点用地减少幅度最大,分别由 2012 年的 6 951.44hm²、4 067.55 hm²减少至 2020 年的 3 666.67 hm²、820.00 hm²,所占青浦区总面积的比重由 10.38%、6.07%降至 5.47%和 1.22%;旱地、城镇用地和交通运输用地呈增加的状态,其中旱地和城镇用地增加最多,其比重分别由 2012 年的 14.24%、16.56%增加至 2020 年的 18.98%和 21.41%。青浦区旱地主要种植经济作物和蔬菜,旱地的增加提高了集约农业土地利用的经济价值,同时对农业技术的推广提出了较高的要求。

表 4 青浦区土地利用结构优化方案

Tab.4 Optimized Plan for Land-use Structure in Qingpu District

变量	2012年		2020年		变化情况	
	面积(hm ²)	所占比重(%)	面积(hm ²)	所占比重(%)	面积(hm ²)	所占比重(%)
耕地X ₁	21 015.19	31.38	23 711.00	35.40	2 695.81	4.02
旱地X _{1a}	9 539.79	14.24	12 711.00	18.98	3 171.21	4.73
水田X _{1b}	11 475.40	17.13	11 000.00	16.42	-475.40	-0.71
园地X ₂	877.75	1.31	877.75	1.31	0.00	0.00
林地X ₃	5 789.62	8.64	5 789.60	8.64	-0.02	0.00
养殖水面X ₄	6 951.44	10.38	3 666.67	5.47	-3 284.77	-4.90
其他农用地X ₅	1 058.35	1.58	759.11	1.13	-299.24	-0.45
农村居民点用地X ₆	4 067.55	6.07	820.00	1.22	-3 247.55	-4.85
城镇用地X ₇	11 091.27	16.56	14 338.82	21.41	3 247.55	4.85
交通运输用地X ₈	3 162.20	4.72	4 050.42	6.05	888.22	1.33
水域及水利设施用地X ₉	12 963.63	19.36	12 963.63	19.36	0.00	0.00
合计	66 977.00	100.00	66 977.00	100.00	0.00	0.00

由表 5 可知，2020 年青浦区土地利用结构优化方案的经济效益为 4613 197.84 万元，相比 2012 年，经济效益增加 28.12%，同时减少了 TN、TP 输出 169.08 t 和 79.83 t，降幅分别为 10.96%、41.33%，有效降低了非点源污染风险。优化土地利用结构是实现区域可持续土地利用，促进经济发展和保证生态环境安全的有效途径。

表 5 土地利用结构调整前后经济效益和生态效益比较
Tab.5 Comparison of Economic and Ecological Benefit Before and After the Adjustment of Land-use Structure

指标	调整前	调整后	变化
总氮(t/a)	1 543.08	1 374.00	-169.08
总磷(t/a)	193.15	113.32	-79.83
经济效益(万元)	3600 719.91	4613 197.84	1012 477.93

2.2 空间分区

(1)阻力面的生成

依据最小耗费距离计算方法，将研究区划分为 30 m×30 m 栅格，根据栅格的土地利用类型赋予阻力系数，构建代价表面，利用 Arcgis10.1 空间分析模块中成本距离(Cost Distance)计算得到 TN 迁移阻力面、TP 迁移阻力面及生态用地扩张阻力面(图 1a)。根据地表水质标准中，TN 和 TP 的浓度限值，设置权重将 TN 迁移阻力面和 TP 迁移阻力面进行叠加，得到非点源污染迁移阻力面(图 1b)。然后对生态用地扩张阻力面和非点源污染迁移阻力面进行归一化处理，并采用公式(2)，得到青浦区非点源污染土地利用格局阻力模型，最终阻力值在 -0.998~0.991 之间(图 2)。以淀山湖和主要湖泊为源地的生态用地扩张的阻力面随着距离的增加从“源”向外逐步扩张，阻力值越来越大，从青浦区西部的源地向东部和南部阻力值逐步增加，青浦区生态用地向南部和东北方向的扩张空间最大。以农村居民点为污染源的非点源污染迁移的阻力面，低阻力值区呈现围绕农村居民点密集的点状分布特征，高值区为远离农村居民点、耕地及城镇用地的淀山湖等主要湖泊区域。

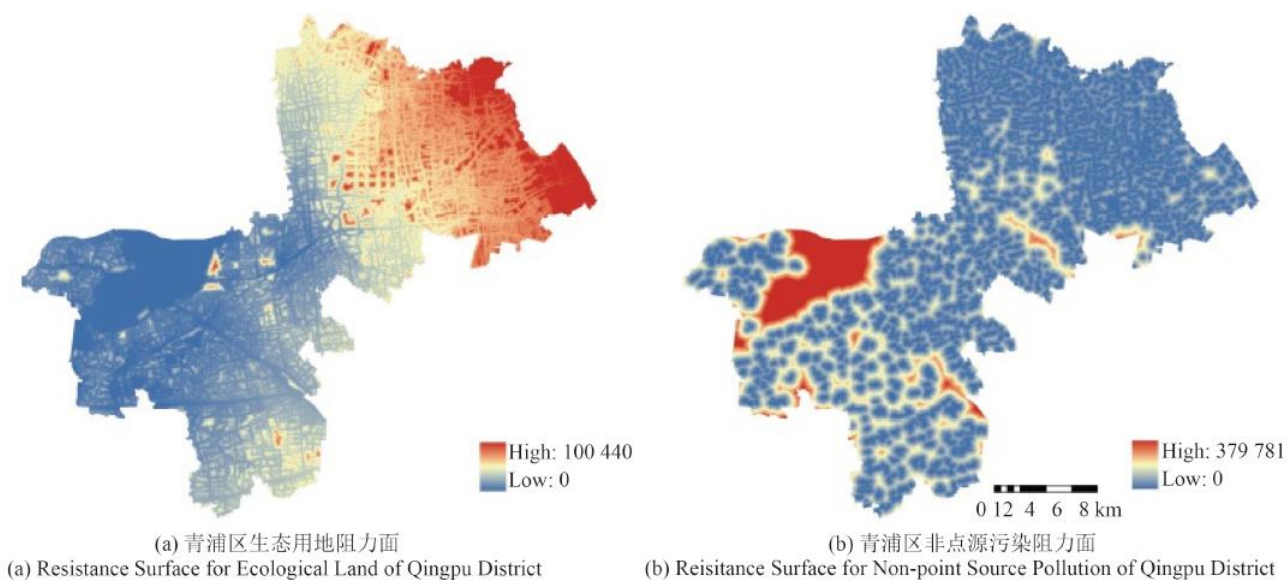


图 1 青浦区生态用地阻力面
Fig.1 Resistance Surface for Ecological Land of Qingpu District

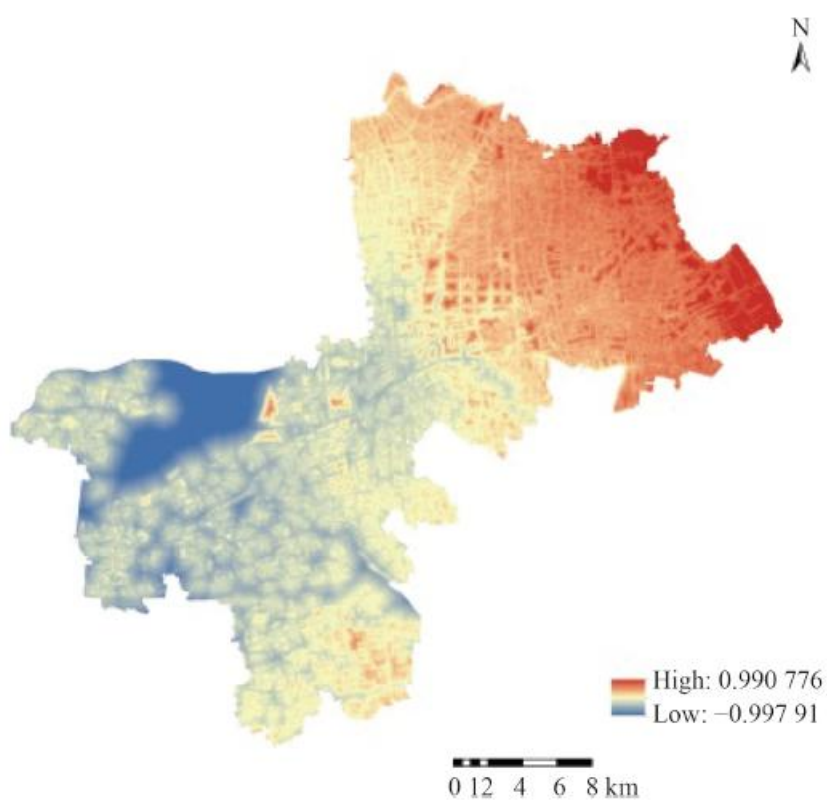


图 2 青浦区生态用地阻力面与非点源污染阻力面的差值
Fig.2 Resistance Surface Difference Between Qingpu District Ecological Land and Non-point Source Pollution

(2) 基于水资源保护和非点源污染控制的分区防控方案

分区阈值一般通过寻找突变点确定，本文以最小累积阻力差值与栅格数目关系的突变点和分界点 0 作为分区阈值(表 6)，从水资源保护和非点源污染防控的角度将青浦区划分为 5 个区域，即水资源保育区、水资源重点防护区、非点源污染一般阻控区、非点源污染中等阻控区及非点源污染重点阻控区(图 3)，5 个区域面积分别为 3 966.32 hm²、10 875.21 hm²、29 560.48 hm²、11 797.12 hm²和 10 777.88 hm²。

表 6 青浦区水资源保护与非点源污染阻控阈值区间

Tab.6 Threshold Range for Water Resource Protection and Non-point Pollution Control of Qingpu District

分区类型	像素值区间
水资源保育区	-0.998~-0.181
水资源重点防护区	-0.181~0
非点源污染一般阻控区	0~0.256
非点源污染中等阻控区	0.256~0.414
非点源污染重点阻控区	0.414~0.991

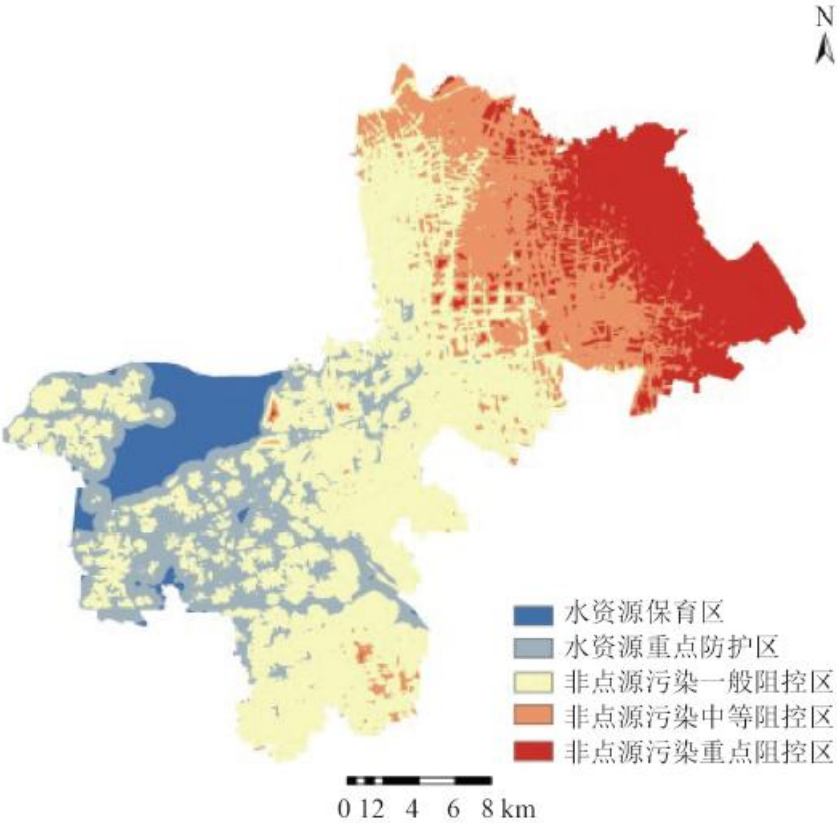


图 3 青浦区基于非点源污染控制的土地利用分区防控方案

Fig.3 Non-point Source Pollution Control Based Land-use Zoning Protection Scheme of Qingpu District

①水资源保育区主要分布在青浦西部的淀山湖及其他主要湖泊，该区域为上海市主要的水源地之一，承担着上海市 50% 的饮水量。鉴于此，上海市政府将其列为上海市水源地保护区，执行最严格的保护规定，管理措施需严格实行《上海市饮用水水源保护条例》和《上海市水环境功能区划》等的相关规定，“严禁一切对水质和水量产生不利影响的开发建设活动”（例如禁止网箱养殖、旅游游泳、垂钓和严禁使用化肥和农药等）。此外，实行严格的土地用途管制，限制和逐步减少渔业和畜牧业等高环境负荷的土地利用方式，适当增加湿地、林地等生态用地面积，以保障饮用水的可持续供给。

②水资源重点防护区主要分布在金泽镇和朱家角镇北部和练塘北部的水网区域，该区域水系发达，坑塘水面众多，应重点关注河道的连通性和廊道景观的保持，同时禁止生活垃圾填埋、生活废水直排河道，恢复坑塘水面和末端河流的自然植被，维持河流的自然形态和增强其联通性。

③非点源污染的阻控区主要以采用多种技术措施控制非点源污染物进入水体为主导，同时适当减少高非点源污染负荷的土地利用类型的面积。其中，非点源污染的一般阻控区主要分布在盈浦街道、夏阳街道，朱家角镇和练塘的南部，香花桥街道和白鹤镇的西部区域，该区域是水资源重点防护区与非点源污染中等防控区相衔接的过渡区域，在维持水系、坑塘水面的自然景观和连通性外，还需进行土地利用类型和结构调整，减少高非点源污染输出负荷的土地利用面积。值得注意的是，分布于水资源重点保护区内的非点源污染一般阻控区还需围绕该区域边缘划设缓冲带，以减少非点源污染物向水资源重点防护区的迁移。此外，提高城镇化水平，逐步减少农村居民点面积，积极开展淀山湖等主要饮用水源地的农村生活污水治理，也是综合治理非点源污染一般阻控区的关键措施之一。

④非点源污染中等防护区和重点防护区主要分布在华新镇、重固镇、赵巷镇和徐泾镇以及香花桥街道和白鹤镇的东部区域，该区域非点源污染物迁移导致的环境风险较高。因此，该区域需采取多种措施减少非点源污染物的输出，以及通过多种技术手段阻控非点源污染物进入水体，针对已受 TN、TP 污染的水体应实施修复治理工程，逐步提高水体的环境质量。

3 讨论

优化土地利用结构，科学划分非点源污染风险控制分区，建立差异化的分区防控机制是有效控制非点源污染风险的关键。本文以青浦区为例，采用灰色线性规划与最小累积阻力模型相结合的方法，对区域非点源污染风险控制进行了有益尝试。灰色线性规划模型具有良好地解决非线性问题的能力和易适性的特点，弥补了一般线性规划的不足，有效解决了土地资源数量的优化配置问题。然而，灰色线性规划参数的精准度直接关系到土地数量优化结果的准确性，因此参数预测方法的选择至关重要。传统的灰色模型 GM(1, 1) 主要适用于单一指数增长数据序列，对序列数据波动较大的情形预测精度较低，限制了灰色预测模型的广泛应用。DGM 作为 GM(1, 1) 模型的精确形式，采用离散形式对 GM(1, 1) 模型进行改进，弥补了常规 GM(1, 1) 预测模型的不足^[23]。因此，本文采用 DGM(1, 1) 进行相关参数的预测，得到了较好地预测精度。

基于最小累积阻力模型的空间区划方法，综合考虑了景观单元间的内在联系，在生态安全格局优化方面具有良好的适用性和扩展性^[24]，本文充分考虑了水源地保护和非点源污染迁移 2 方面的因素，所构建的分区防控模式便于不同区域提出具有针对性的防控措施，与传统水资源保护的水利片划分的保护模式相比，在空间上凸显了保护机制的差异性。最小累积阻力模型的空间分区优势可为区域土地利用规划、城市总体规划等提供空间数据支撑，从而有利于从规划层面协调水资源保护和防控非点源污染风险。阻力系数的设定是最小阻力模型分析的重要前提，阻力系数强调的是各土地利用类型对水资源保护和非点源污染阻控的相对影响大小，本文以生态系统服务价值和各土地利用类型非点源污染输出负荷为依据，分别赋予水资源保护和非点源污染迁移不同的阻力系数，并对数值进行归一化处理，得到了相对较高的模拟精度。然而非点源污染防控是一个十分复杂地过程，既有土壤类型、坡度、植物覆被、降雨等自然因素，亦有化肥投入、农田管理措施等人为因素；同时还受到人口、城市乡镇污水管网等因素的影响。因此，探讨综合以上因素科学构建阻力系数，应成为下一步研究的重点方向之一。

4 结论

本文以上海市青浦区为案例研究区,以非点源污染风险控制为目标,采用灰色线性规划与最小累积阻力模型,进行非点源污染风险差异化分区防控研究。主要结论如下:

(1)采用灰色线性规划方法构建土地利用结构优化模型,求解综合效益导向下青浦区土地利用结构,2020年青浦区土地利用结构优化方案的经济效益为4613 197.84万元,相比2012年,经济效益增加28.12%,同时减少了TN、TP的输出169.08t和79.83t,降幅分别为10.96%、41.33%,有效降低了非点源污染风险。

(2)运用最小累积阻力模型,在空间上划设水资源保育区、水资源重点防护区、非点源污染一般阻控区、非点源污染中等阻控区及非点源污染重点阻控区,并针对不同分区提出具有针对性的防控措施。由此表明,优化土地利用结构和构建空间差异化防控机制是有效调控非点源污染风险,实现区域可持续土地利用,促进经济发展和保证生态环境安全的有效途径。

参考文献:

[1] 张海龙,齐实,路倩倩,等.基于水功能区的湖北省农业非点源污染控制区划[J].中国水土保持科学,2014,12(2):1-8.

【ZHANG H H, QI S, LU Q Q, et al. Control zone of agricultural nonpoint source pollution based on water function zone in Hubei province[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2014, 12(2):1-8.】

[2] 丁恩俊.三峡库区农业面源污染控制的土地利用优化途径研究[D].重庆:西南大学博士学位论文,2010.

【DING E J. A land-use optimization approach for agricultural nonpoint sources pollution control in the three-gorge reservoir area[D].Chongqing: Doctor Dissertation of Southwest University, 2010.】

[3] 高超,朱继业,窦贻俭,等.基于非点源污染控制的景观格局优化方法与原则[J].生态学报,2004,24(1):109-116.

【GAO C, ZHU J Y, DOU Y J, et al. Landscape management practices for the control of non-point source pollution: methods and principals[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(1): 109-116.】

[4] LIU R M, ZHANG P P, WANG X J, et al. Assessment of effects of best management practices on agricultural non-point source pollution in Xiangxi River watershed[J]. Agricultural Water Management, 2013, 117: 9-18.

[5] STREHMEL A, SCHMALZ B, FOHRER N. Evaluation of land use, land management and soil conservation strategies to reduce non-point source pollution loads in the Three Gorges region, China[J]. Environmental Management, 2016, 58(5): 906-921.

[6] ZHANG P, LIU Y H, PAN Y, et al. Land use pattern optimization based on CLUE-S and SWAT models for agricultural non-point source pollution control[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2013, 58(3/4): 588-595.

[7] 熊繁,邵景安.不同土地利用情景下农村景观生态格局优化[J].中国农业资源与区划,2016,37(2):11-21.

【XIONG F, SHAO J A. The optimization of rural landscape ecological pattern of different land use scenarios:

a case of Longhua town, Jiangjin district of Chongqing[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2016, 37(2): 11 - 21.】

[8] SEPPELT R, VOINOV A. Optimization methodology for land use patterns using spatially explicit landscape models[J]. Ecological Modelling, 2002, 151(2/3): 125 - 142.

[9] 石燕璐. 基于非点源污染控制的土地利用优化途径研究[D]. 南京:南京农业大学硕士学位论文, 2011.

【SHI Y L. The research of land-use optimization approach based on non-point source pollution controlled-A case in Yixing city[D].Nanjing: Master Dissertation of Southwest University, 2011.】

[10] 韩赵钦. 基于 SWAT 模型的滇池流域不同土地利用配置下的非点源污染研究[D]. 武汉: 华中农业大学硕士学位论文, 2013.

【HAN Z Q. Research on non-point source pollution caused by land use allocation of Dianchi watershed based on SWAT model[D].Wuhan: Master Dissertation of Huazhong Agricultural University, 2013.】

[11] 钱晓雍, 沈根祥, 顾海蓉. 黄浦江上游水源保护区农田氮磷养分平衡分析[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(8): 115 - 119.

【QIAN X Y, SHEN G X, GU H R. Analysis on nitrogen and phosphorous balances of farmlands in upper-reaches water resource protection zone of Huangpu river[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(8): 115 - 119.】

[12] 王寿兵, 钱晓雍, 赵 钢, 等. 环淀山湖区域污染源解析[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(3): 331 - 336.

【WANG S B, QIAN X Y, ZHAO G, et al. Contribution analysis of pollution sources around the Dianshan lake[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22(3): 331 - 336.】

[13] ZHAO Z, ZHANG H L, LI C S, et al. Quantifying nitrogen loading from a paddy field in Shanghai, China with modified DNDC model[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, 197: 212 - 221.

[14] 钱晓雍. 上海淀山湖区域农业面源污染特征及其对淀山湖水质的影响研究[D]. 上海: 复旦大学硕士学位论文, 2011.

[15] 刘思峰, 党耀国, 谢乃明, 等. 灰色系统理论及其应用[M]. 5 版. 北京:科学出版社, 2010.

[16] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值[J]. 资源科学, 2015, 37(9): 1740 - 1746.

【XIE G D, ZHANG C X, ZHANG C S, et al. The value of ecosystem services in China[J]. Resources Science, 2015, 37(9): 1740 - 1746.】

[17] 杨怀宇, 李 晟, 杨正勇. 池塘养殖生态系统服务价值评估——以上海市青浦区常规鱼类养殖为例[J]. 资源科学, 2011, 33(3): 575 - 581.

【YSNG H Y, LI S, YANG Z Y. Valuation of pond aquaculture ecosystem services: a case study of common fish aquaculture in Qingpu, Shanghai[J]. Resources Science, 2011, 33(3): 575 - 581.】

[18] 孙丕苓, 杨海娟. 商洛市土地利用结构优化的情景分析[J]. 水土保持通报, 2012, 32(2): 200 - 205.

【SUN P L, YANG H J. Land use structure optimization in Shangluo city of Shaanxi province: scenario analysis[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(2): 200 - 205.】

[19] 俞孔坚, 李迪华, 段铁武. 生物多样性保护的景观规划途径[J]. 生物多样性, 1998, 6(3): 205 - 212.

【YU K J, LI D H, DUAN T W. Landscape approaches in biodiversity conservation[J]. Chinese Biodiversity, 1998, 6(3): 205 - 212.】

[20] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局[J]. 生态学报, 1999, 19(1): 8 - 15.

【YU K J. Landscape ecological security patterns in biological conservation[J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(1): 8 - 15.】

[21] 刘 杰, 叶 晶, 杨 婉, 等. 基于 GIS 的滇池流域景观格局优化[J]. 自然资源学报, 2012, 27(5): 801 - 808.

【LIU J, YE J, YANG W, et al. A GIS-based landscape pattern optimization approach for lake Dianchi watershed[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(5): 801 - 808.】

[22] 金 妍, 车 越, 杨 凯. 基于最小累积阻力模型的江南水乡河网分区保护研究[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(1): 8 - 14.

【JIN Y, CHE Y, YANG K. Zoning of river network protection based on minimum cumulative resistance model[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22(1): 8 - 14.】

[23] 谢乃明, 刘思峰. 离散 GM(1, 1) 模型与灰色预测模型建模机理[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 25(1): 93 - 99.

【XIE N M, LIU S F. Discrete GM (1, 1) and mechanism of grey forecasting model[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2005, 25(1): 93 - 99.】

[24] 李 晶, 蒙古军, 毛熙彦. 基于最小累积阻力模型的农牧交错带土地利用生态安全格局构建——以鄂尔多斯市准格尔旗为例[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2013, 49(4): 707 - 715.

【LI J, MENG J J, MAO X Y. MCR based model for developing land use ecological security pattern in farming-pastoral zone: a case study of Jungar Banner, Ordos[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2013, 49(4): 707 - 715.】