

土地利用变化影响的灞河流域潜在非点源 污染风险时空变化特征

聂启阳^{1,2}, 吕继强^{1,2}, 孙夏利³, 罗平平^{1,2}, 时迪迪⁴, 薛强^{1,2}, 沈冰⁵

(1. 长安大学环境科学与工程学院, 陕西西安 710054; 2. 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西西安 710054; 3. 陕西省水文水资源勘测局, 陕西西安 710068; 4. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 5. 西安理工大学西北旱区生态水利工程国家重点实验室, 陕西西安 710048)

摘要: 流域内土地利用方式改变引起非点源污染源的时空变化, 已显著影响地表、地下水环境质量。以人类活动影响强烈的灞河流域为例, 采用改进后的潜在非点源污染指数模型(PNPI), 探讨近20年半干旱区城市型河流土地利用变化影响下的流域潜在非点源污染风险时空变化特征及其主导因素。结果表明: 灞河流域主要土地利用方式为林地与耕地, 共占流域面积的85%。1995–2015年间西安实施区域融合发展战略, 河流下游平原区城镇用地扩张近4倍, 侵占大量原有草地与耕地; 基于Quantile分类法, 将研究区潜在非点源污染风险值划分为极低、低、中等、高和极高等级, 区域流域内潜在非点源污染风险呈现两极分化现象, 即人类活动影响区的非点源污染风险增强, 极高风险区迅速扩张, 同时上游水源区的非点源污染风险降低; 近期, 西安市城镇化的快速推进是流域极高潜在非点源污染风险区域迅速扩张的主要原因。

关键词: 土地利用变化; 非点源污染; 污染风险; 非点源污染指数(PNPI)模型; 时空变化特征; 灞河流域;

中图分类号: X522

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)05-0080-09

Spatial and temporal variations of non-point source pollution risk affected by land use changes in Bahe River Basin

NIE Qiyang^{1,2}, LÜ Jiqiang^{1,2}, SUN Xiali³, LUO Pingping^{1,2}, SHI Didi⁴, XUE Qiang^{1,2}, SHEN Bing⁵

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region of Ministry of Education, Xi'an 710054, China; 3. Shaanxi Survey Bureau of Hydrology and Water Resources, Xi'an 710068, China; 4. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 5. State Key Laboratory Base of Eco-Hydraulic in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The spatiotemporal variations of non-point source pollution from land use changes have significantly affected the surface water and groundwater quality of the basin. In this paper, Bahe River Basin, strongly affected by human activities, is chosen as an example, and the improved potential non-point source pollution index (PNPI) model was used, to quantitatively analyze the spatiotemporal variations and the main factors of potential non-point source pollution (PNP) risk affected by land use changes in arid area cities in the latest 20 years. The results showed that the main land use patterns in the Bahe River Basin were forest land and cultivated farmland, accounting for 85% of the total basin area. Urban area in the lower reaches of the river basin expanded nearly four times, encroaching on a large number of original grassland and cultivated land due to the strategy of regional integration development in Xi'an from 1995 to 2015. The Quantile classification method was applied to divide the PNPI risk grades into extremely low, low, medium, high and extremely high levels. The extremely high-risk area expanding rapidly as the urbanization in middle and lower reaches of the study watershed, while that the risk level of

收稿日期: 2019-03-14; 修回日期: 2019-05-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51679185); 中国博士后基金项目(2017M623088)

作者简介: 聂启阳(1993-), 男, 四川自贡人, 硕士研究生, 主要从事水文模型相关研究。

通讯作者: 吕继强(1983-), 男, 陕西咸阳人, 博士, 副教授, 主要从事干旱区水资源与水环境保护研究。

PNP reduced in the upstream after the water environmental protection measures. Urbanization in Xi'an City is the main reason for the rapid expansion of PNP areas with extremely high risk in the Bahe River Basin.

Key words: land use change; non-point source pollution; PNPI (potential non-point pollution index) model; spatial and temporal variation; Bahe River Basin

1 研究背景

我国北方半干旱地区水资源天然禀赋不足,近些年不断加速的城镇化建设,已显著影响流域地表水、地下水环境质量。当前,水资源紧张、水污染已经成为我国实现经济社会可持续发展及改善人民生活的严峻挑战^[1-2]。流域水污染问题经政府及各方学者的共同努力正在得到有效控制,但流域非点源污染问题成为环境质量持续改善的瓶颈^[3-4]。流域非点源污染具有复杂性、规模性、高危害性及潜伏性等特点,导致其治理和控制更加困难^[5]。

流域非点源污染定量化研究多采用模型量化的方法^[6]。常用于非点源污染量化评估的模型有:SWAT模型、ANSWERS模型、AnnAGNPS模型等,但这些模型对于数据量及数据精度的要求较高,在缺乏监测数据的地区适用性较差^[7-8]。潜在非点源污染指数(Potential Non-point Pollution Index, PNPI)模型通过概化污染物的产生、降解及输移过程,描述区域潜在非点源污染风险^[9]。该模型作为一种基于GIS的流域非点源污染风险评价工具,因其较少的数据需求及较高的准确性,已越来越多的受到国内外研究者的关注。Cecchi等^[10]使用PNPI模型评估了意大利中部维泰博省潜在非点源污染风险分布;武晓峰等^[11]使用PNPI模型评估了密云县典型流域的污染负荷分布,验证了该模型在国内的适用性;李婷等^[12-13]对模型进行了土地利用类型拓展及土地利用对比分类等改进,使得模型在我国适用性进一步提高。目前对于PNPI及其改进模型的研究多集中在小流域的潜在非点源污染风险现状评价,而针对历史土地利用变化影响下的流域潜在非点源污染风险演变特征研究较少^[14-15]。

灞河是连接秦岭与渭河的重要纽带、西安市主要城市生态补偿区,随着流域内不断加强的城镇化建设,水环境污染有加强的趋向^[16-17]。本文选择秦岭北麓典型城市河流灞河作为研究对象,基于改进后的PNPI模型,研究土地利用变化影响下的流域潜在非点源污染风险时空变化特征。解析1995-2015年灞河流域潜在非点源污染风险的时空变异特征,探求近20年来流域潜在非点源污染风险变化

的主导因素,为流域水资源管理、水环境治理提供依据和参考。

2 研究区概况

灞河古称滋水,是渭河一级支流,位于西安市东南部(E 109°00'~109°47'、N 33°50'~34°27'),南起秦岭,由南向北汇入渭河,总流域面积为2 581 km²。灞河流域范围涉及西安市39个镇,交通发达^[18]。河流中下游长期的农耕作业对区域水环境始终产生着较大压力,而近年来区域内的人口数量激增与城镇面积迅速扩张,对流域水环境造成的影响不可忽视。根据2000-2007年及2015-2017年的水质监测数据,灞河入渭河口处河流水质为V类^[19-20]。灞河流域位置及高程信息见图1。

3 数据来源与方法

3.1 基于变异系数决策法改进的PNPI模型

潜在非点源污染指数(Potential Non-point Pollution Index, PNPI)模型所需数据较易获取,已广泛用于定量化评估流域不同土地利用方式对河流及其他地表水的潜在非点源污染风险等级^[9-12]。模型主要将空间污染物的产生、降解及输移过程分别概化为空间分布的土地利用指标、距离指标和径流指标,并将流域的空间潜在非点源污染风险表达为3个指标的函数^[11]。原PNPI模型综合3个指标的函数表达为专家打分法所划分的固定权重,使得模型的客观性与适用性方面有所不足。因此,本文采用基于信息熵原理所设计的客观赋权方法——变异系数决策法,改进原PNPI模型客观性与适用性方面的不足,改进后的模型结构见图2。

3.2 数据来源

PNPI模型计算所需数据主要包括空间数据与属性数据两部分。其中空间数据包括数字高程图、土壤类型图和土地利用图;属性数据包括土壤渗透性数据与土地利用属性数据。模型计算所需数据来源见表1。土壤渗透能力分级以HWSO数据库为基础,使用美国农业部开发的SPAW(Soil-Plant-Air-Water)6.02软件计算各土壤饱和下渗率,再对比美国国家自然保护局(NRCS)的水文分组(HYDGRP)标准将土

壤的渗透性分为 A、B、C、D 4 类,研究区内土壤水文分组主要为 B 及 C 类。土地利用属性数据包括各土地利用的指标值及不同水文分组下的径流参数,二者皆从 PNPI 已有专家评分体系及参数体系中查询,或结合实测实验研究加以拓展。

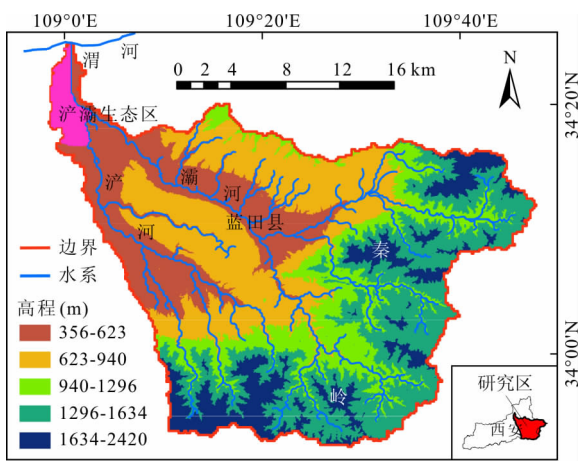


图 1 灞河流域位置及高程分布图

由于各空间数据来源不同,所采用的坐标系也有差异,应投影或转换到同一投影坐标系之下便于后期计算。本研究根据流域面积统一重采样为 300 m × 300 m 分辨率的栅格数据,选取 1995、2000、2005、2010 和 2015 年为代表年。研究区域土壤类型分布及所选取的代表年土地利用类型状况分别见图 3 与 4。

3.3 土地利用指标

土地利用指标 *LCI* (land cover indicator) 表示不同

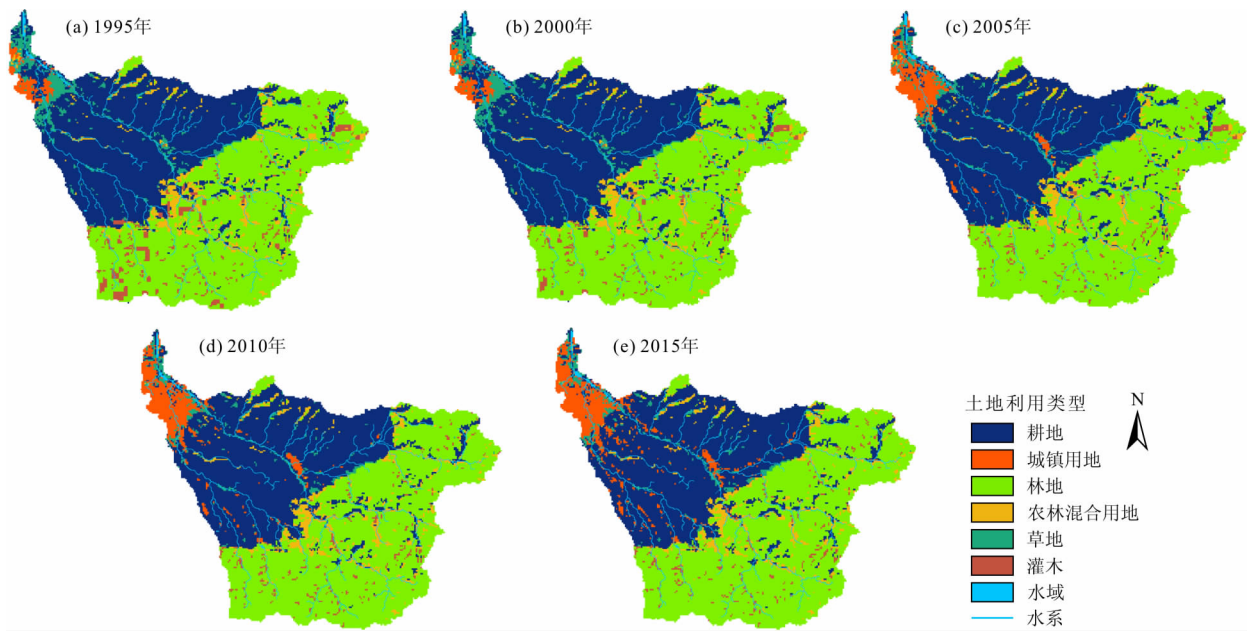


图 4 研究区各代表年土地利用图

土地利用类型对受纳水体所产生的潜在污染负荷量。某种土地利用类型的土地利用指标越高,表征其潜在污染负荷量越大,则污染风险越高。参考已有研究成果^[21],本文采用专家打分法得出的 PNPI 模型中土地利用指标,专家根据自己专业知识对不同土地利用类型的潜在污染物产生量进行打分判断,分值为 0 ~ 10。

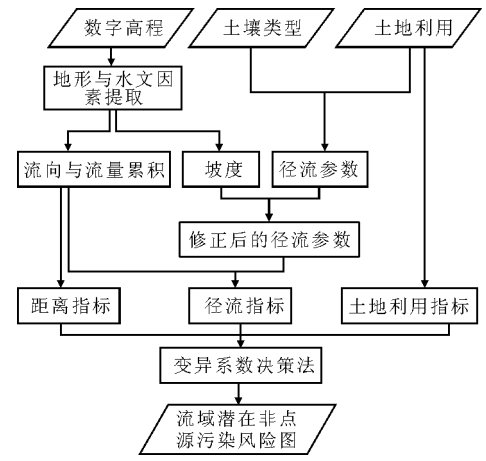


图 2 改进的潜在非点源污染指数 (PNPI) 模型结构

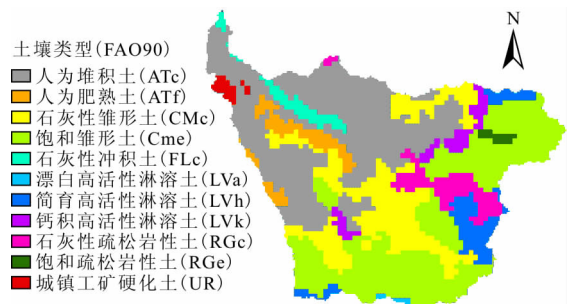


图 3 研究区土壤类型分布

表 1 PNPI 模型所需数据及本研究数据来源

数据类型	名称	数据格式	数据概述	数据名	来源
空间数据	数字高程图	Grid	90m × 90m 分辨率	SRTMDEMUTM90	中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台
	土壤类型图	Grid	1km × 1km 分辨率	HWSD	寒区旱区科学数据中心
	土地利用图	Grid	300m × 300m 分辨率	ESACCI – LC	ESA(European Space Agency)
属性数据	土壤渗透性数据	csv	研究区内各土壤渗透等级		根据 HWSD 中土壤参数以经验公式或 SPAW 计算
	土地利用属性数据	csv	研究区内各土地利用类型经验参数		对比欧洲 CORINE 土地利用分类与 PNPI 模型已有经验系数获取

评分所参与的专家数量越多,涉及的研究领域越广泛,评分标准差越低,则所得到的结果越可靠。参考 Cecchi 等^[10]及武晓峰等^[11]研究筛选出研究区内所涉及的土地利用指标值及评分标准差见表 2。

表 2 土地利用指标表

土地利用类型	土地利用指标(0 ~ 10)	标准差
水域	0.14	0.38
耕地	7.73	2.16
农林混合用地	5.67	1.94
林地	0.44	0.88
草地	1.94	2.27
灌木	0.78	1.09
城镇用地	8.22	2.22

3.4 距离指标与径流指标

距离指标 DI (distance indicator) 用于概化污染源在汇流中迁移路径上的降解等过程。距离指标越高,表征汇流距离越短,距离河网越近,从而降解作用影响越小,污染风险越高。其计算公式为:

$$DI = \text{Exp}(- (D \cdot k)) \tag{1}$$

式中: DI 为距离指标值; D 为汇流距离,以单元格数为单位; k 为常数,参照 Cecchi 等^[10]研究取值 0.090533。

径流指标 ROI (run-off indicator) 用于概化由地形、土壤、土地利用等因素对于污染物的输移和下渗过滤等过程。径流指标越高,表征下渗过滤强度越低,最终进入受纳水体的污染物越多,则污染风险越高。其计算公式为:

$$ROI = (\sum_{i=1}^n CROP_i)/n \tag{2}$$

$$CROP = ROP + C \tag{3}$$

式中: ROI 为径流指标值; $CROP_i$ 为汇流路径上第 i 个单元坡度修正后的径流参数,范围为 0 ~ 1,当公式(3) 计算结果大于 1 时取 1; n 为汇流路径上的单元数; ROP 为径流参数,本研究参照 Cecchi 等^[10]及武晓峰等^[11]研究提供的不同土地利用及水文分组下的径流参数整理出研究区的径流参数表(见表 3)及坡度修正系数 C 。

表 3 研究区径流参数表

土地利用类型	土壤水文分组			
	A	B	C	D
水域	0	0	0	0
耕地	0.66	0.78	0.85	0.89
农林混合用地	0.52	0.70	0.78	0.85
林地	0.36	0.60	0.73	0.79
草地	0.49	0.69	0.79	0.84
灌木	0.36	0.60	0.73	0.79
城镇用地	0.75	0.85	0.90	0.92

3.5 潜在非点源污染指数

潜在非点源污染指数 $PNPI$ 概化评估流域范围内不同土地利用类型对河流及其他地表水体所可能产生的污染负荷强度,是土地利用指标、距离指标及径流指标的综合函数表达。原 $PNPI$ 模型计算仍然采用专家打分法,权值固定,导致客观性和实用性方便稍有不足,公式为:

$$PNPI = 4.8 LCIS + 2.6 ROIS + 26 DIS \tag{4}$$

式中: $PNPI$ 为潜在非点源污染指数; $LCIS$ 为标准化后的土地利用指标值; $ROIS$ 为标准化后的径流指标值; DIS 为标准化后的距离指标值。3 个指标的标准化方式采用公式(5) 处理:

$$X_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{i \min}}{x_{i \max} - x_{i \min}} \quad (5)$$

式中: X_{ij} 为第 i 个指标集的第 j 个元素标准化值; x_{ij} 为第 i 个指标集的第 j 个元素; $x_{i \max}$ 和 $x_{i \min}$ 分别为第 i 个指标集中的最大值和最小值。

变异系数决策法根据各指标的相对变化幅度大小为变量的权重赋值,不受主观因素影响,计算所得权重系数更为严谨^[22]。本研究采用变异系数决策法优化原模型在综合 3 个指标时所采用的权重。其具体计算步骤为:

(1) 求出各指标变异系数:

$$CV_i = \frac{\sigma_i}{\bar{X}_i} \quad (6)$$

式中: CV_i 为 i 指标集变异系数; $\bar{X}_i$ 为第 i 个指标集均值; σ_i 为第 i 个指标集标准差。

(2) 计算得出各指标权重并求得潜在非点源污染指数值:

$$W_i = \frac{CV_i}{\sum_{i=1}^m CV_i} \quad (7)$$

$$PNPI = W_{lei} \cdot LCIS + W_{roi} \cdot ROIS + W_{di} \cdot DIS \quad (8)$$

式中: W_i 为 i 指标集权重; W_{lei} 、 W_{roi} 、 W_{di} 分别为土地利用指标、径流指标、距离指标的权重系数。

4 结果与分析

4.1 土地利用时空变化解析

对研究区内各代表年土地利用情况进行统计,获得土地利用类型面积图(见图 5)。林地与耕地是流域内的主要土地利用类型,常年占总面积的 85% 左右。1995–2015 年间仅水域面积较为稳定,面积上呈减少趋势的土地利用类型包括:耕地、草地、灌木及农林混合用地,其中草地与灌木的缩减速度最为明显,2015 年面积较 1995 年缩减了近一半;而林地与城镇用地呈现增长趋势,其中城镇面积的扩张速度最为显著,2015 年面积较 1995 年扩大了近 4 倍。

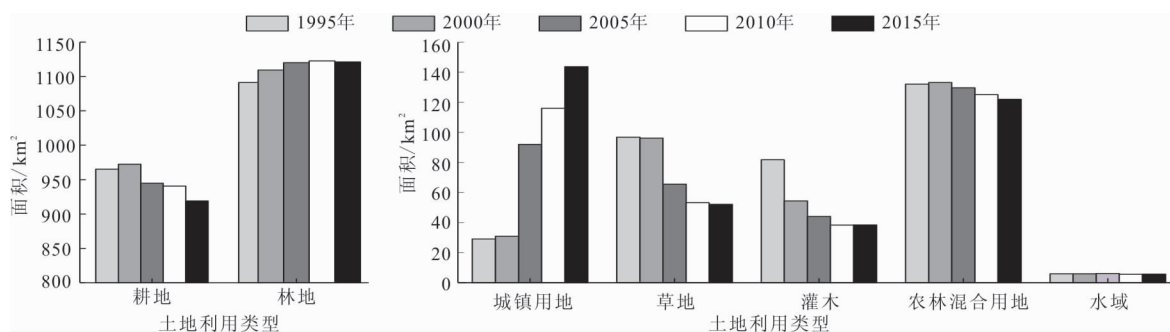


图5 研究区各代表年各土地利用类型面积图

为了准确获取各土地利用类型的内在转换关系,对 1995、2000、2005、2010 及 2015 年土地利用空间数据进行空间数据分析,获取研究区域 4 个时段的土地利用转移矩阵(表 4)和土地利用转换概率热图(图 6)。结合表 4 和图 6 结果,1995–2000 年主要为灌木大幅度向林地与耕地的转化导致后两者的面积增大;2000–2005 年大量草地与耕地转化为城镇用地,导致城镇用地面积在该时间段内迅速扩张,林地面积的部分上升主要来自于灌木及农林混合用地;2005–2010 年城镇面积的扩张仍然主要由草地与耕地面积转换,农林混合用地的小幅度下降是由于转化为耕地,林地的小幅度上升主要来自于耕地和灌木面积的缩减;2010–2015 年城镇面积的扩张主要是侵占自耕地面积,农林混合用地的小幅度下降主要是由于转化为耕地。

1995–2015 年来灞河流域土地利用类型变化特点总体上表现为:下游浐灞生态区及中上游蓝田县域城镇的大面积扩张引起的草地与耕地向城镇用地转化,上游山区实施生态保护的建设和退耕还林使得灌木、农林混合用地和耕地向林地转化,导致区域林地面积上升近 30 km²。

4.2 潜在非点源污染风险时空变化解析

本文以 1995 年为基准年,基于 Quantile 分类法,将研究区内各期潜在非点源污染指数划分为 5 个风险等级,并划分出各代表年极低、低、中等、高和极高等级区域(图 7)。结果表明,1995–2015 年间,研究区内各等级潜在非点源污染风险面积变化较大,其中河流下游城市区的高风险及极高风险区域面积扩大。依据空间变化统计研究区内潜在非点源污染风险面积图(图 8)。

表 4 1995 – 2015 年沪灞河流域土地利用转移矩阵 km²

时段(年)	土地利用类型	耕地	草地	农林混合用地	林地	灌木	城镇用地	水域
1995 – 2000	耕地	964.8	0	0	0	0	0.54	0
	草地	0	95.94	0	0	0	0.81	0
	农林混合用地	0	0	131.4	0.09	0	0.54	0
	林地	2.34	0.09	0.54	1088.10	0.18	0	0
	灌木	5.22	0.09	1.17	21.15	54.18	0	0
	城镇用地	0	0	0	0	0	29.07	0
	水域	0	0	0	0	0	0	5.94
2000 – 2005	耕地	908.19	12.33	10.62	9.72	0.36	30.24	0.9
	草地	11.88	51.3	1.53	0.27	0.09	30.33	0.72
	农林混合用地	8.91	0.72	100.8	19.89	0.99	1.53	0.27
	林地	13.5	0.18	15.57	1070.73	9.27	0	0.09
	灌木	0.54	0.09	0.81	19.26	33.21	0.36	0.09
	城镇用地	0.45	0.9	0.27	0	0	29.34	0
	水域	1.35	0	0	0.18	0.18	0.18	4.05
2005 – 2010	耕地	875.52	14.49	12.24	24.03	0.72	16.92	0.9
	草地	18.99	30.87	0.36	0.36	0	14.85	0.09
	农林混合用地	20.88	1.44	76.59	27.72	0.81	1.98	0.18
	林地	16.29	2.25	34.74	1049.49	17.1	0	0.18
	灌木	1.08	0.45	0.81	20.79	20.43	0.18	0.36
	城镇用地	5.94	3.69	0.09	0	0	81.9	0.36
	水域	1.8	0.18	0.18	0.18	0	0.18	3.6
2010 – 2015	耕地	851.76	15.39	14.85	21.24	1.17	35.28	0.81
	草地	13.86	27.99	0.63	0.9	0.45	8.82	0.72
	农林混合用地	19.44	1.44	76.05	26.01	1.53	0.36	0.18
	林地	21.42	1.17	29.79	1052.73	17.46	0	0
	灌木	0.63	0.18	0.54	20.25	17.46	0	0
	城镇用地	10.98	5.76	0	0	0.09	98.55	0.63
	水域	0.99	0.27	0.09	0	0.27	0.63	3.42

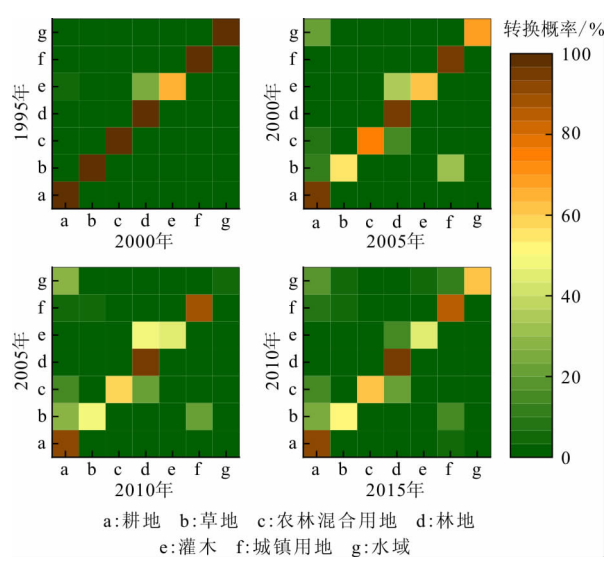


图 6 1995 – 2015 年研究区土地利用转换概率热图

结果表明, 1995 – 2015 年间极低风险区域面积稳定; 中级风险与高风险区域面积呈逐年递减趋势, 其中高风险区域下降幅度最为显著, 2015 年较 1995 年减少了近 40%, 低与极高风险区域面积呈逐年递增趋势, 其中极高风险区域上升幅度最为显著, 2015 年较 1995 年增加了 46%。

同时, 为准确获取各等级风险区域的内在转换关系。对 1995、2000、2005、2010 及 2015 年潜在非点源污染区划数据进行空间数据分析, 获取研究区域 4 个时段的潜在非点源污染风险转移矩阵(表 5)和潜在非点源污染风险转换概率热图(图 9)。

由表 5 和图 9 可以看出: 1995 – 2000 年各风险区域变幅较小, 主要为中等级风险区域向低等级风险区域的部分转化导致低风险区域面积略有上升, 高等级区域向极高区域的部分转化导致极高风险区域面积

略有上升;2000 - 2005 年各风险区域面积变幅最大,其中由中、高等级风险区域向极高风险等级区域的大面积转化导致极高风险的显著增加,低等级风险区域面积的部分增长也是主要由中等风险区域向低等级风险区域的转化所引起的;2005 - 2010 年各风险区

域面积变幅降低,极高风险面积的增加来源主要是中、高等级风险区域向极高风险等级区域的转化;2010 - 2015 年各风险等级区域面积变幅进一步降低,极高风险面积的小幅度增加来源主要是高等级风险区域向极高风险等级区域的转化。

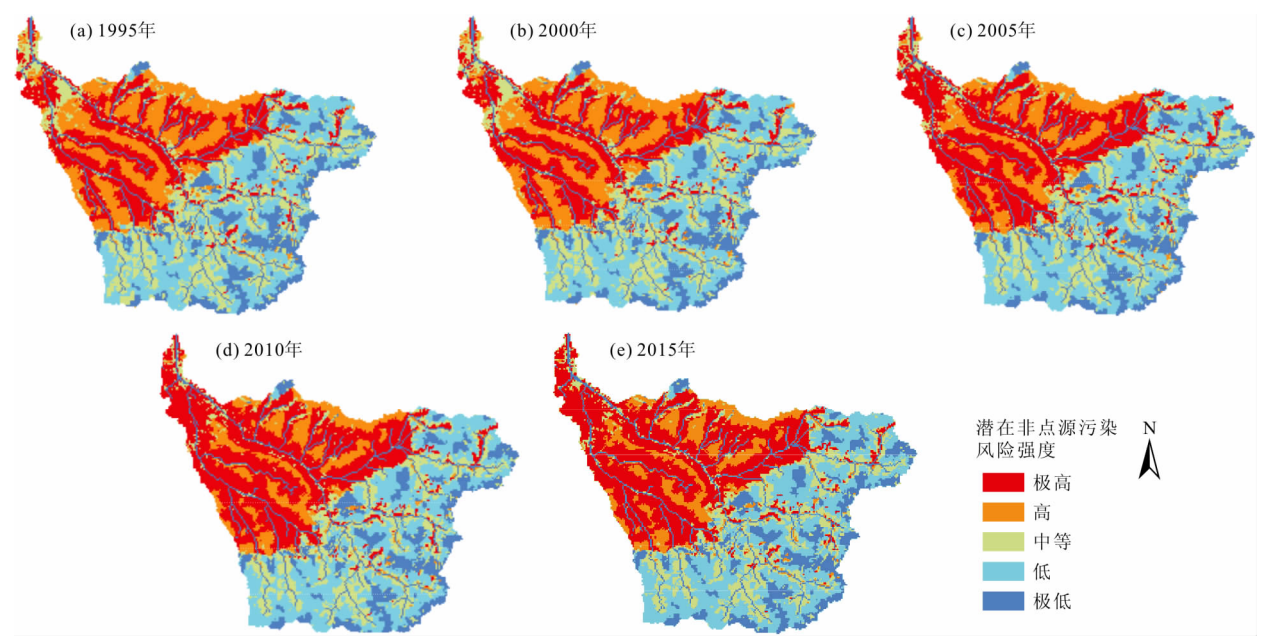


图 7 研究区各代表年潜在非点源污染风险区划图

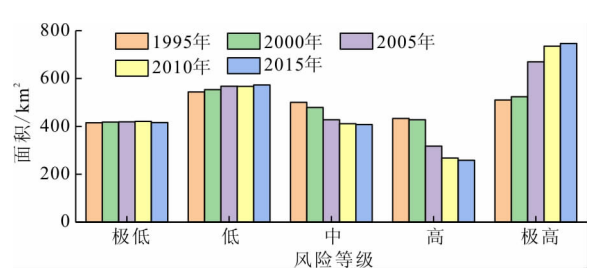


图 8 潜在非点源污染风险分级面积图

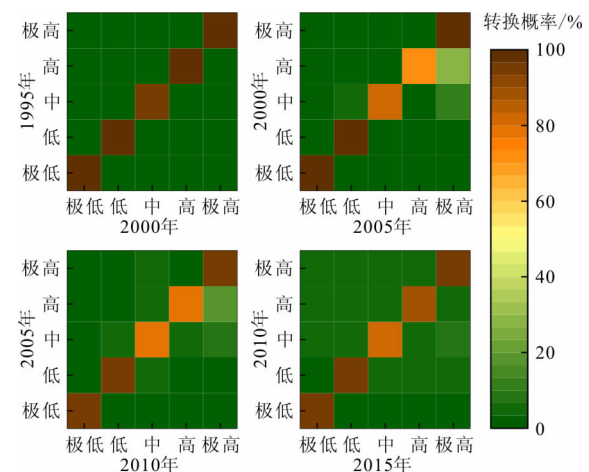


图 9 1995 - 2015 年潜在非点源污染风险分级转换概率热图

总体上,高风险与极高等级风险区域长期集中

在中下游,1995 - 2015 年来灞河流域潜在非点源污染风险变化呈现出向两极分化的现象,即人类活动影响集中的沣灞生态区及蓝田县等城镇区域的中等风险区域转化为高等级风险区域,中下游河道沿岸耕地极高等级风险区域辐射状扩张,面积增幅达 46%,转换自大面积高等级风险区域;同时以上游水源区为核心的非点源污染风险降低。

4.3 潜在非点源污染风险变异分析

综合土地利用与潜在非点源污染风险的时空变化解析,二者在时空上的变化特征具有高度一致性。高风险与极高等级风险区域长期集中在中下游大面积的城镇用地与农地区域。1995 - 2000 年期间流域下游主要为灌溉耕地,城市化程度较低,潜在非点源污染极高风险区域主要集中在下游城镇区域及河道沿岸;2004 年西安市确定重点发展“四区两基地”,成立沣灞生态区,区域的产业、经济、建设水平全面提升,导致 2005 年及之后下游沣灞生态区的城镇面积迅速扩张,中间伴随着沪陕高速建设及区域经济发展,蓝田县及中游沿岸乡镇面积也在这一时段迅速增长,随之而来的是极高潜在非点源污染风险区域也以这些城镇区域为核心迅速外扩,城镇扩张是极高潜在非点源污染风险变化的主因。另一方

面自 1999 年在陕西开展退耕还林及育林工程等生态保护建设,灞河流域上游秦岭区域灌木、农林混合用地和耕地向林地转化,林地面积逐年提高,使得流域上游潜在非点源污染风险降低。

表 5 1995 – 2015 年潜在非点源污染风险分级转移矩阵 km²

时段(年份)	潜在非点源污染风险等级	极低	低	中	高	极高
1995 – 2000	极低	414.63	0.36	0	0	0
	低	0	539.73	1.17	1.71	1.17
	中	3.6	13.5	477.63	1.98	3.6
	高	0	0	0	424.17	8.91
	极高	0	0	0	0	510.03
2000 – 2005	极低	404.64	5.22	5.22	1.98	1.17
	低	5.4	533.07	10.53	0.36	4.23
	中	6.93	25.92	385.74	13.05	47.16
	高	1.53	1.08	10.44	300.33	114.48
	极高	0.54	2.43	15.93	1.89	502.92
2005 – 2010	极低	398.97	5.85	10.44	2.34	1.44
	低	4.23	529.92	27.54	0.18	5.85
	中	13.23	22.86	334.17	14.94	42.66
	高	3.87	1.35	11.52	245.43	55.44
	极高	0.72	7.47	27.45	4.77	629.55
2010 – 2015	极低	397.71	9.45	9.63	3.51	0.72
	低	4.14	531.99	23.04	0.45	7.83
	中	10.62	23.13	329.31	13.23	34.83
	高	2.52	1.08	13.5	234.81	15.75
	极高	1.08	7.65	32.22	6.75	687.24

5 结 论

本文以人类活动影响强烈的灞河流域为例,采用改进后的潜在非点源污染指数模型(PNPI),探讨 1995 – 2015 年半干旱区城市型河流土地利用变化影响的流域潜在非点源污染风险时空变化特征及其主导因素。主要结论如下:

(1)灞河流域主要土地利用方式为林地与耕地,耕地主要集中于流域中游,林地集中在上游区域,二者总面积常年占流域面积 85% 左右。1995 – 2015 年间以灞河下游浐灞生态区、中游蓝田县等区域为核心的城镇用地面积激增近 4 倍,侵占大量原有草地与耕地;上游水源区灌木、农林混合用地和耕地有向林地逐年转化趋势,使林地面积逐年上升,20 年内总增长面积 30 km² 左右。

(2)灞河流域 1995 – 2015 年间潜在非点源污染风险时空变化呈现出明显的两极分化现象,即人

类活动影响集中的灞河下游浐灞生态区、中游蓝田县和中下游河道沿岸耕地为核心的非点源污染风险增强,极高风险区呈辐射状扩张,面积增幅达 46%;同时上游水源区为核心的非点源污染风险降低。

(3)土地利用与潜在非点源污染风险的时空变化有较高一致性,高与极高等级风险区域集中在中下游城镇用地与河道沿岸耕地区域,低与极低等级风险区域集中在上游林地区域。流域内城镇面积的扩张是流域极高风险潜在非点源污染区增大的主要原因,林地的增长是流域低与极低风险潜在非点源污染区增大的主要原因。

(4)1995 – 2015 年间,灞河流域在城市化发展及生态保护措施的共同作用下,流域土地利用变化较大,下游水环境所面临的潜在非点源污染风险逐年增加,同时,上游水源区潜在非点源污染风险逐年下降。因此,下游城镇用地与河道沿岸耕地区域应作为未来非点源污染控制优先区或流域综合治理的

重点治理区域,通过植被过滤带、人工湿地等低影响开发措施降低其污染风险。

参考文献:

- [1] YANG Xiaoying, LIU Qun, LUO Xingzhang, et al. Spatial regression and prediction of water quality in a watershed with complex pollution sources [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 8318.
- [2] 吴舜泽, 刘鸿亮, 夏青. 中国流域水污染分析[J]. *环境科学与技术*, 2000(2): 1-6.
- [3] 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[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(10): 2234-2241.
- [4] VÖRÖSMARTY C J, MCINTYRE P B, GESSNER M O, et al. Global threats to human water security and river biodiversity[J]. *Nature*, 2010, 467(7315): 555-561.
- [5] 贺缠生, 傅伯杰, 陈利顶. 非点源污染的管理及控制[J]. *环境科学*, 1998(5): 87-91.
- [6] 郝改瑞, 李家科, 李怀恩, 等. 流域非点源污染模型及不确定分析方法研究进展[J]. *水力发电学报*, 2018, 37(12): 54-64.
- [7] 娄永才, 郭青霞. 岔口小流域非点源污染模型 AnnAGNPS 不确定性分析[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(5): 956-964.
- [8] 于涛, 孟伟, ONGLEY E, 等. 我国非点源负荷研究中的问题探讨[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(3): 401-407.
- [9] MUNAFO M, CECCHI G, BAIOTTO F, et al. River pollution from non-point sources: a new simplified method of assessment [J]. *Journal of Environmental Management*, 2005, 77(2): 93-98.
- [10] CECCHI G, MUNAFO M, BAIOTTO F, et al. Estimating river pollution from diffuse sources in the Viterbo province using the potential non-point pollution index[J]. *Ann Ist Super Sanita*, 2007, 43(3): 295-301.
- [11] 武晓峰, 李婷. 流域内污染负荷分布的评价模型研究——以密云县蛇鱼川小流域为例[J]. *中国环境科学*, 2011, 31(4): 680-687.
- [12] 李婷, 武晓峰. 基于 PPI 的河段水体潜在污染研究[J]. *环境科学*, 2010, 31(11): 2619-2626.
- [13] 李婷. 基于 PPI 的流域污染负荷分布评价研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
- [14] PUCCINELLI C, MARCHEGGIANI S, MUNAFO M, et al. Evaluation of aquatic ecosystem health using the potential non point pollution index (PNPI) tool[M]. *Diversity of Ecosystems*, Intech, 2012.
- [15] 张汪寿, 耿润哲, 王晓燕, 等. 基于多准则分析的非点源污染评价和分区——以北京怀柔区北宅小流域为例[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(1): 258-266.
- [16] 倪永明, 胥彦玲. 灞河流域非点源污染最佳管理措施模拟研究[J]. *干旱区地理*, 2015, 38(3): 608-617.
- [17] 孙小军, 魏炳乾, 周孝德, 等. 西安市灞河流域水环境现状分析及治理对策[J]. *自然灾害学报*, 2009, 18(5): 168-173.
- [18] 孙旭, 宋孝玉. 西安市灞河流域水环境问题及治理措施[J]. *水资源与水工程学报*, 2009, 20(5): 44-48.
- [19] 王战平. 灞河地表水水质现状及污染防治对策[J]. *水资源与水工程学报*, 2009, 20(2): 145-147.
- [20] 赵串串, 徐晶, 温怀峰. 基于 WASP 模型的灞河流域氨氮水质达标管理方案研究[J]. *安徽农业大学学报*, 2018, 45(2): 302-308.
- [21] SHEN Zhenyao, ZHONG Yucen, HUANG Qin, et al. Identifying non-point source priority management areas in watersheds with multiple functional zones[J]. *Water Research*, 2015, 68: 563-571.
- [22] 王立盟, 孟浩. 基于熵值和变异系数组合赋权法的生态文明评价体系构建及实证分析[J]. *高技术通讯*, 2018, 28(4): 372-381.