

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20212557

泾灞河中下游水质时空变化特征及其与土地利用类型的关系

李晓科¹, 连炎清², 徐新涵¹, 方焱¹, 王璇¹

(1. 西安地球环境创新研究院, 陕西 西安 710061; 2. 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为探究泾灞河中下游水质时空变化特征及其与土地利用类型的关系, 设置了17个采样点, 分别于2019年4(平水期)、8(丰水期)、12月(枯水期)进行采样监测, 运用统计学方法分析水质时空分布特征并识别主要污染因子, 利用 Spearman 相关分析法探究土地利用类型面积占比与水质指标的相关关系。结果表明, 2019年泾灞河中下游水质具有一定时空分异性。时间上来看, $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度值丰水期最大, TP、 COD_{Mn} 的浓度值均为丰水期>平水期>枯水期; 空间上来看, $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、 COD_{Mn} 浓度值从中游到下游基本呈上升趋势。受沿岸人类活动的影响, 泾灞河中下游存在营养盐和有机物污染。建设用地与污染物浓度呈正相关, 起“源”作用; 林地与污染物浓度呈负相关, 起“汇”作用。研究成果可为泾灞河流域水环境管理提供参考。

关键词: 泾灞河中下游; 水质; 土地利用类型; 相关性

中图分类号: [TV11]; X824

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)01-0059-04

1 引言

泾灞河是泾河和灞河的总称, 均发源于秦岭, 地处西安市, 其中灞河是渭河的支流, 全长 104 km, 流域面积 2 581 km²; 泾河是灞河的一级支流, 全长 64.6 km, 流域面积 760 km², 于西安市北谭家堡汇入灞河后, 在三郎村汇入渭河^[1]。作为西安市重要的城市河流, 泾灞河是秦岭山区和渭河连接的重要桥梁, 同时也是西安市的人文景观水体, 有重要的观赏价值和经济价值^[2]。近年来, 随着社会经济的发展, 水体污染情况日益加重^[3]。目前, 关于泾灞河流域水质评价的研究成果较多, 但关于流域土地利用类型与水质响应关系的研究甚少。本文以泾灞河中下游流域为研究区, 在分析水质时空分布特征的基础上, 利用相关系数探究土地利用类型对水质的影响, 研究结果可为泾灞河流域水环境管理提供参考。

2 样品采集与研究方法

2.1 样品采集与处理

在泾河设置 6 个采样点(A1~A6), 灞河设置 11 个采样点, 其中两河交汇前设置 7 个采样点(B1~B7), 交汇后设置 4 个采样点(C1~C4), 于 2019 年 4(平水期)、8(丰水期)、12 月(枯水期)采集水样, 4 月因客观因素未在 B5、C3、C4 采集, 采样点名称和地理位置见表 1、图 1。所有水样均在水深 0.5 m 处采集, 将 250 mL 水样存储在广口瓶用于测定氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)、亚硝态氮($\text{NO}_2\text{-N}$)、溶解性磷、总磷(TP), 将 60 mL 水样存储在

表 1 采样点位置

Tab. 1 Sampling point location

编号	采样点	距入灞河口距离/km	编号	采样点	距入渭河口距离/km
A ₁	魏寨街	33.21	B ₁	白鹿桥	45.93
A ₂	东高村	27.20	B ₂	薛家河村	40.70
A ₃	桃溪园	16.45	B ₃	张家湾村	34.91
A ₄	沁水源	9.43	B ₄	灞桥东李小学	29.15
A ₅	桃花潭	5.81	B ₅	灞桥湿地公园上游	24.74
A ₆	欧亚国际	1.31	B ₆	灞河生态湿地公园	17.64
			B ₇	欧亚大道	11.86
			C ₁	广运潭公园	8.83
			C ₂	东风路桥	4.58
			C ₃	泾灞湿地公园	2.39
			C ₄	灞河出口	0.86

收稿日期: 2021-11-24, 修回日期: 2022-03-31

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC3201103); 中国科学院“西部之光”人才培养引进计划资助项目(2018); 陕西省重点研发计划项目(S2020-YF-GHZD-0061)

作者简介: 李晓科(1991-), 女, 硕士, 研究方向为水环境, E-mail: 1197040098@qq.com

通讯作者: 连炎清(1962-), 男, 教授、博导, 研究方向为环境水文模拟, E-mail: ylian@llinois.edu

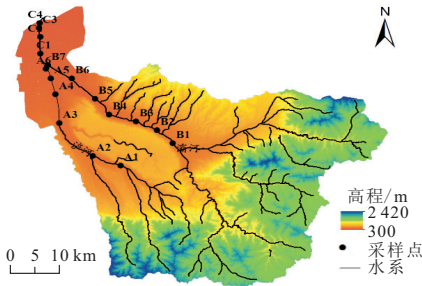


图 1 产灞河中下游采样点位置

Fig. 1 Sampling sites in the middle and lower reaches of Chanba River

酸化的广口瓶用于测定高锰酸盐指数(COD_{Mn}),现场利用多参数便携式分析仪 YSI 测定水温、pH 值、EC、DO、浊度,在室内使用流动分析仪 AA3 测定 NH₃-N、NO₂⁻-N、TP、溶解性磷,采用酸性高锰酸盐滴定法测定 COD,所有指标均平行测定 3 次,数据分析取平均值。

2.2 分析方法

2.2.1 因子分析

因子分析是一种降维处理方法,从多个变量中提取出较少、互不相关、抽象的综合指标,即为因子,每个原变量可用提取出的公因子的线性组合表示^[4],具体表示为:

$$Z_k = \alpha_{k1}F_1 + \alpha_{k2}F_2 + \alpha_{k3}F_3 + \dots + \alpha_{km}F_m + U_k \quad k=1,2,\dots,n \quad (1)$$

式中, Z_k 为第 k 个变量的标准化分数; α_{km} 为第 m 个因子相对于第 k 个变量的因子载荷; F_m 为第 m 个因子相对于第 k 个变量的因子载荷; U_k 为 Z_k 的唯一因素; m 为所有变量公因子的数目; n 为变量个数。

2.2.2 主成分回归分析

主成分多元线性回归分析法(APCS-MLR)是一种基于因子得分,评价各因子对各变量贡献率的统计方法。将变量值与因子得分进行多元线性回归,根据回归参数得到针对各因子的估计值,从而确定因子对各变量的贡献值^[5]。具体表示为:

$$M_s = a_{os} + \sum_{p=1}^{n_1} A_{ps}A_{APCS_p} \quad (2)$$

式中, M 为第 s 个变量的实测值; a_{os} 为第 s 个变量的多元回归常数项; A_{ps} 为第 p 个因子对第 s 个变量的回归系数; A_{APCS_p} 为调整后的第 p 个因子的分数; n_1 为因子个数; $A_{ps}A_{APCS_p}$ 为第 p 个因子对 M_s 的质量贡献率,所有样本的 $A_{ps}A_{APCS_p}$ 的平均值为因子平均贡献率。

2.2.3 水质指标与土地利用类型的相关性分析

土地利用类型数据来源于清华大学宫鹏教授 2017 年全球 10 m 地表覆盖数据 ([http://data.](http://data.ess.tsinghua.edu.cn/)

[ess.tsinghua.edu.cn/](http://data.ess.tsinghua.edu.cn/))。提取各采样点不同缓冲区的土地利用数据,采用 Spearman 相关分析法建立土地利用类型面积占比与水质指标的相关关系,其中土地利用的提取在 ArcGIS10.7 软件完成,土地利用类型面积占比与水质指标相关关系的建立在 SPSS26.0 软件完成。

3 结果与讨论

3.1 水质指标时空分布特征

3.1.1 水质指标的时间变化特征

将所有指标数据进行标准化处理。如图 2 所示,DO 浓度枯水期>平水期>丰水期,这可能与气温影响水体 DO 含量有关,温度较高水体中的氧气更易饱和^[6],丰水期气温最高,因此 DO 含量最低;丰水期浊度高于平水期浊度和枯水期浊度,可能是丰水期降雨较多且集中,雨水冲刷并携带大量污染物进入河流导致^[7];NH₃-N、NO₂⁻-N、溶解性磷、TP、COD_{Mn} 浓度均在丰水期最高,其中 NO₂⁻-N、溶解性磷、TP、COD_{Mn} 浓度值均表现为丰水期>平水期>枯水期。丰水期 TP、NH₃-N、COD_{Mn} 浓度最高可能是强烈的人为活动引起,主要包括:①夏季居民生活用水增多导致产生更多的污水;②夏季农业生产过程中过量施用化肥,未被吸收利用的营养物质随降雨径流入河中^[8]。

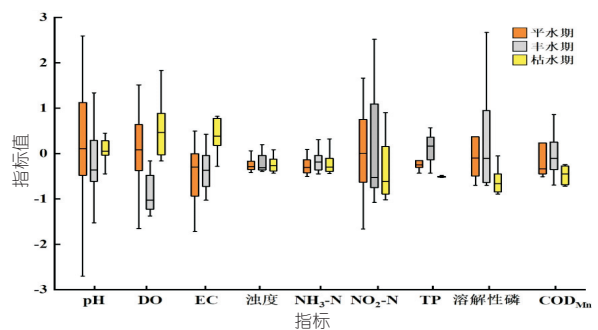


图 2 产灞河水质指标的时间特征

Fig. 2 Temporal characteristics of indexes in Chanba River

3.1.2 水质指标的空间变化特征

如图 3(图 3 中 pH 值无量纲,EC 单位为 $\mu\text{s}/\text{cm}$,浊度单位为 NTU,其他水质指标单位为 mg/L)所示,产灞河呈弱碱性;EC 浓度空间差异性较小;浊度除个别断面外,空间差异较小;不同水期 NH₃-N、NO₂⁻-N、溶解性磷、TP、COD_{Mn} 浓度值基本从中游到下游呈上升趋势,其中产河 NH₃-N、NO₂⁻-N、TP 浓度基本高于灞河(两河未交汇前),平水期 NH₃-N、TP、COD_{Mn} 浓度均在 A6 断面达到峰值,丰水期 NH₃-N、TP 浓度均在 A4 断面最大,COD_{Mn} 在 B6 断面达到峰值;枯水

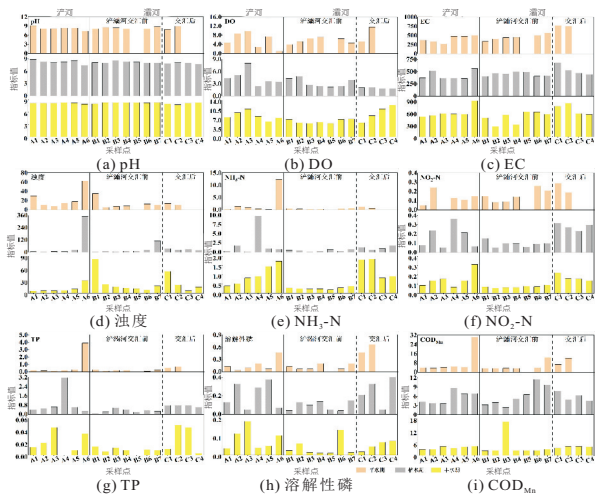


图 3 产澜河水质指标的空间特征
Fig. 3 Spatial characteristics of different indexes in Chanba River

期 COD_{Mn} 在 B3 断面最大; 不同水期 NH_3-N 、TP 浓度最高值均出现在建设用地面积占比较高的区域, COD_{Mn} 浓度最高值出现在建设用地与农业用地面积占比较高的区域。这些地区人类活动活跃, 工农业活动和城镇生活产污较多, 导致污染物浓度较高。

3.2 污染因子识别

三个水期水质指标数据标准化处理并进行 Kaiser-Meyer-Olkin(KMO)和 Bartlett 球形检验(KMO 均大于 0.5, Bartlett 的显著性均为 0)后, 进行因子分析, 结果见表 2。根据特征值大于 1 的原则, 三个水期均提取了 3 个因子 F_1 、 F_2 、 F_3 , 累计解释方差分别为 84.18%、77.12%、75.08%。

平水期 F_1 解释了 46.08% 的水质信息, 相关指标为 DO、浊度、TP、 COD_{Mn} , 代表了营养盐与有机物污染。 F_2 解释了 22.85% 的水质信息, 相关指标为 $NO_2^- -N$ 、溶解性磷、EC, 表明含离子、氮磷元素的水平, 进一步反映了营养盐的影响。 F_3 解释了 15.25% 的水质信息, 相关指标为水温, 表明水体物理化学性质, 说明水温对水质有一定程度影响。

表 2 不同水期水质指标的因子载荷矩阵

Tab. 2 Factor load matrix of water indexes in different water periods

指标	平水期			丰水期			枯水期		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3
水温	-0.01	0.18	0.97	0.89	-0.32	-0.15	0.50	-0.70	0.02
DO	-0.70	0.22	-0.43	-0.17	-0.11	-0.77	0.16	0.81	-0.11
pH 值	-0.59	-0.07	0.60	0.21	-0.77	-0.31	-0.85	0.18	0.17
浊度	0.86	-0.07	0.04	-0.18	0.92	-0.07	0.26	-0.56	-0.46
EC	0.02	0.94	0.27	-0.40	0.27	0.73	0.88	-0.03	0.12
NH_3-N	0.94	0.14	-0.24	0.90	0.09	0.18	0.88	-0.03	-0.06
$NO_2^- -N$	-0.03	0.73	-0.19	0.58	-0.12	0.70	0.85	0.12	-0.08
TP	0.94	0.23	-0.14	0.38	0.89	0.10	0.80	0.26	0.08
溶解性磷	0.35	0.83	0.14	0.90	-0.03	-0.07	0.28	0.86	-0.08
COD_{Mn}	0.85	0.38	-0.04	0.91	-0.01	0.19	0.06	-0.15	0.92
特征值	4.61	2.28	1.52	4.11	2.38	1.23	4.07	2.32	1.11
方差贡献率/%	46.08	22.85	15.25	41.06	23.74	12.32	40.73	23.23	11.12
累计方差贡献率/%	46.08	68.93	84.18	41.06	64.8	77.12	40.73	63.96	75.08

丰水期 F_1 的方差贡献率为 41.06%, 相关指标为水温、 NH_3-N 、溶解性磷、 COD_{Mn} , 代表营养盐和有机物污染。研究区农业禽类活动强烈且有制造业、汽车业等企业, 推测营养盐污染由生活污水点源及农田施肥和畜禽养殖的面源双重污染造成, 有机物污染由工业废水和生活有机物排入河中导致。 F_2 的方差贡献率为 23.74%, 相关指标为 pH 值、浊度、TP, pH 值反映水体的酸碱度; TP 代表磷元素水平; 浊度代表悬浮物水平。 F_3 的方差贡献率为 12.32%, 相关指标为 DO、EC、 $NO_2^- -N$, 反映水体中离子水平。

枯水期 F_1 的方差贡献率为 40.73%, 相关指标为 pH 值、 NH_3-N 、 $NO_2^- -N$ 、TP、EC, 此类污染主要来源于过量营养盐。 F_2 的方差贡献率为 23.23%, 相关指标为 DO、溶解性磷, 代表磷元素污染。枯水期主要为点源污染^[9], 营养盐污染可能与生活污水的排放有关, 因此 F_1 、 F_2 可归纳为居民生活污水造成的营养盐污染。 F_3 的方差贡献率为 11.12%, 相关指标为 COD_{Mn} , 表明有机物污染, 反映了水体受工业及生活有机物污染程度。

据此, 利用 APCS-MLA 进一步分配污染物来源, 见表 3。平水期 F_1 主要影响浊度、 NH_3-N 、

表 3 公因子对各指标的贡献率
Tab. 3 Source contribution for each variable

指标	平水期				丰水期				枯水期			
	F_1 /%	F_2 /%	F_3 /%	R^2	F_1 /%	F_2 /%	F_3 /%	R^2	F_1 /%	F_2 /%	F_3 /%	R^2
水温	0.43	15.83	83.74	0.97	65.27	23.60	11.12	0.91	40.89	57.00	1.80	0.74
DO	51.70	16.49	31.80	0.72	15.98	10.30	73.72	0.63	14.61	75.47	9.92	0.68
pH 值	46.72	5.27	48.00	0.71	15.89	59.74	24.38	0.73	70.93	15.04	14.04	0.78
浊度	89.26	6.87	3.87	0.82	44.67	51.40	3.92	0.78	20.33	43.58	36.09	0.58
EC	1.30	76.70	22.00	0.95	28.78	19.11	52.11	0.76	85.64	2.81	11.54	0.80
NH_3-N	71.57	10.23	18.20	0.96	76.66	7.75	15.59	0.85	91.18	3.11	5.70	0.78
$NO_2^- -N$	2.84	77.26	19.89	0.58	42.08	8.39	49.53	0.82	80.95	11.28	7.77	0.75
TP	72.12	17.23	10.64	0.96	34.53	56.29	9.17	0.55	70.28	22.92	6.79	0.71
溶解性磷	26.63	62.67	10.70	0.77	89.74	2.69	7.57	0.82	22.71	71.10	6.19	0.78
COD_{Mn}	67.27	29.89	2.84	0.84	81.60	0.90	17.50	0.87	5.18	12.96	81.86	0.86

TP、COD_{Mn},表明主要污染源为营养盐和有机物; F₂ 主要影响 EC、NO₂⁻-N、溶解性磷; F₃ 主要影响水温。丰水期 F₁ 主要影响 NH₃-N、溶解性磷、COD_{Mn},表明污染源主要为营养盐和有机物; F₂ 主要影响 pH 值、TP,表明污染源为营养盐; F₃ 主要影响 DO。枯水期 F₁ 主要影响 pH 值、EC、NH₃-N、NO₂⁻-N、TP,表明污染源主要为营养盐; F₂ 主要影响 DO、溶解性磷; F₃ 主要影响 COD_{Mn},表明污染源主要为有机物。

综上所述,浐灞河中下游流域主要存在营养

盐和有机物污染。

3.3 水质指标与土地利用类型相关性分析

为探究研究区水质指标对土地利用类型的响应关系,采样点缓冲区半径选取 300、500、1 000 m,水质指标选取 NH₃-N、TP、COD_{Mn},利用相关系数分析土地利用类型面积占比与各水质指标之间的关系。图 4 中浐灞河中下游流域土地利用类型以农业用地与建设用地为主,中游以农业用地为主,下游以建设用地为主,随着缓冲区半径不断增大,建设用地面积占比升高。

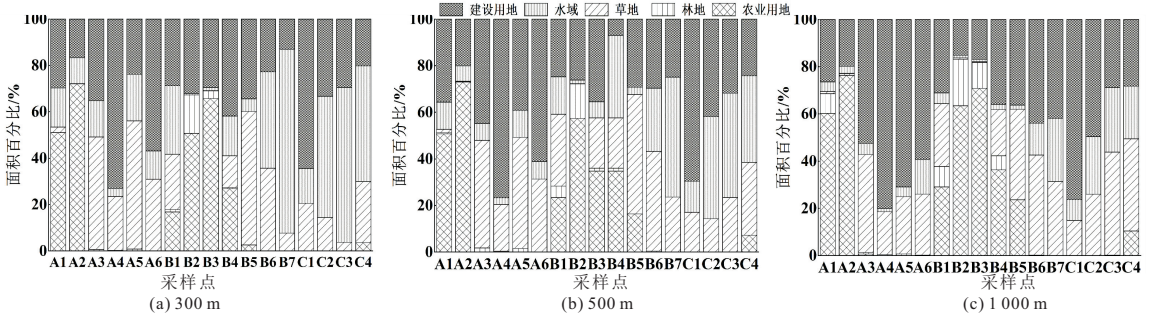


图 4 不同缓冲区内土地利用类型面积比例图

Fig. 4 Ratio of land use types in different buffer zones

由表 4 可知,不同缓冲区建设用地面积比例与水质指标均呈正相关,建设用地意味着人类活动频繁,人类活动产生的生活和工业废水会对水体造成污染负荷。林地与污染物呈负相关,原因有两方面:①林地能够涵养水源,根部可以截留和吸收污染物;②林地面积增加,农业用地和建筑用地面积相应减少,从而减少污染物输出^[10]。与大多数研究结果相反^[11],农业用地与污染物呈负相关,猜测是浐灞河属于城市河流,对于地处高度城镇化的河段而言,在小尺度的研究范围内,建设用地对水质的作用掩盖了农业用地对水质的影响,这与文献[8]结论相符。草地与污染物呈弱相关,说明流域内草地对水体影响较小,但与草地对污染

物起“汇”作用不同,草地与污染物呈正相关,可能是流域内草地的管理方式不当导致^[12]。

4 结论

a. 2019 年浐灞河中下游 NH₃-N、TP、COD_{Mn} 浓度值均在丰水期最高;空间上 NH₃-N、TP、COD_{Mn} 浓度值从中游到下游基本呈上升趋势。

b. 浐灞河中下游存在营养盐污染和有机物污染,营养盐污染主要来自生活污水的点源及农业和养殖禽类的面源,有机物污染主要来源于沿岸工业废水和生活有机物。

c. 浐灞河中下游流域土地利用类型以农业用地与建设用地为主,建设用地对污染物起“源”作用,林地对污染物起“汇”作用。

表 4 不同缓冲区土地利用类型与水质指标的相关性

Tab. 4 Correlation between land use types and water quality indexes in different buffer zones

缓冲区	指标	土地利用类型			
		农业用地	林地	草地	建设用地
300 m	NH ₃ -N	-0.38	-0.78*	0.31	0.21
	TP	-0.41	-0.81*	0.09	0.39
	COD _{Mn}	-0.10	-0.43	0.13	0.13
500 m	NH ₃ -N	-0.28	-0.56	0.08	0.45°
	TP	-0.04	-0.56	0.08	0.67°
	COD _{Mn}	-0.41	-0.51	0.20	0.54**
1 000 m	NH ₃ -N	-0.43	-0.62**	0.18	0.56°
	TP	-0.17	-0.40	0.02	0.53°
	COD _{Mn}	-0.23	-0.57*	0.15	0.48

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

参考文献:

[1] 杜麦,陈小威,王颖. 基于多元统计分析的浐灞河水质污染特征研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2017,38(6):88-92.

[2] 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.

[3] 赵串串,南洋,王雪,等. 灞河流域产流产污的时空特征模拟研究[J]. 水土保持通报,2021,41(1):118-124.

[4] 卜红梅,刘文治,张全发. 多元统计方法在金水河水质时空变化分析中的应用[J]. 资源科学,2009,31(3):429-434.

带水环境承载力评价[J]. 中国环境科学,2020,40(2):896-905.

2020,40(20):7464-7478.

[5] 贺玉晓,苏小婉,任玉芬,等. 中国生态地理区城市水资源利用效率时空分异特征[J]. 生态学报,

[6] KABACOFF R I. R in action: Data analysis and graphics with R[M]. Greenwich: Manning Publications Co. LLC,2015.

Research on Spatio-temporal Evolution and Influencing Factors of Urban Water Environment Governance Efficiency

YUAN Hong-chuan¹,CHEN Ping-ju¹,JIN Liang-hai^{1,2},ZHANG Yue¹

(1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Hubei Key Laboratory of Construction and Management in Hydropower Engineering, Yichang 443002, China)

Abstract: Taking 16 cities and prefectures in Hubei Province as the research object, from the perspective of unexpected output, DEA-SBM model was used to calculate the water environment governance efficiency from 2014 to 2018. Combined with GIS spatial analysis method, the temporal and spatial variation characteristics of urban water environment governance efficiency were explored, and the influencing factors of urban water environment governance efficiency were analyzed by multiple linear regression model. The results show that the efficiency of urban water environmental governance in Hubei Province has rising trend, but there is a difference in time-order changes in water environmental governance between different cities; The efficiency of urban water environment treatment in Hubei Province shows a spatial distribution trend of low in the central region and high in the eastern and western regions; The level of infrastructure and environmental regulation have a significant positive impact on urban water environmental governance, and urbanization level has a significant negative impact on water environmental governance efficiency.

Key words: water environment governance; temporal and spatial evolution; DEA-SBM model; multiple linear regression

(上接第 62 页)

[5] 王昱,卢世国,冯起,等. 黑河上中游水质时空分异特征及污染源解析[J]. 中国环境科学,2019,39(10):4194-4204.

季节变化特征及源解析[J]. 环境科学学报,2013,33(7):1980-1988.

[6] 刘彦龙,郑易安. 黄河干流水质评价与时空变化分析[J]. 环境科学,2022,43(3):1332-1345.

[10] 孙金华,曹晓峰,黄艺. 滇池流域土地利用对入湖河流水质的影响[J]. 中国环境科学,2011,31(12):2052-2057.

[7] 杨浩,李一平,蒲亚帅,等. 张家港市河道水质时空分布特征研究分析[J]. 环境科学学报,2021,41(10):4064-4073.

[11] TONG S T Y, CHEN W L. Modeling the relationship between land use and surface water quality [J]. Journal of environmental management, 2002, 66(4):377-393.

[8] 刘成建,夏军,宋进喜,等. 汉江中下游水质时空特征与土地利用类型响应识别研究[J]. 环境科学研究,2021,34(4):910-919.

[12] 于松延,徐宗学,武玮,等. 北洛河流域水质空间异质性及其对土地利用结构的响应[J]. 环境科学学报,2014,34(5):1309-1315.

[9] 方晓波,骆林平,李松,等. 钱塘江兰溪段地表水质

Spatiotemporal Characteristics of Water Quality and Its Correlation with Land Use Type in Middle and Lower Reaches of ChanBa River

LI Xiao-ke¹,LIAN Yan-qing²,XU Xin-han¹,FANG Yan¹,WANG Xuan¹

(1. Xi'an Institute of Earth Environment Innovative, Xi'an 710061, China;

2. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to explore the spatiotemporal characteristics of water quality and its correlation with land use type in the middle and lower reaches of the Chanba River, sampling and monitoring were conducted in April(wet period), August(flow period)and December(dry period)of 2019 based on seventeen sampling sites. The spatial-temporal characteristics of water quality and the identification of main pollution factors were analyzed by employing multivariate statistical, and the relationship between the land use type and water quality indexes was studied by the method of Spearman analysis. The results show that water quality had spatial and temporal characteristics in the middle and lower reaches of Chanba River in 2019. In terms of time, the concentration values of NH₃-N, TP and COD_{Mn} were maximum in flow period; The order of TP and COD_{Mn} was sorted as flow period > wet period > dry period. Spatially, the concentrations of NH₃-N, TP and COD_{Mn} basically increased from the middle reaches to the lower reaches. Influenced by human activities along the river, the water quality was mainly polluted by nutrient and organic matter in the middle and lower reaches of Chanba river. Construction land had a positive correlation with pollutants and played a "source" role, while forest had a negative correlation with pollutants and played a "sink" role. The results can provide reference for water environmental management in Chanba River Basin.

Key words: middle and lower reaches of Chanba River; water quality; land use type; relativity