

内蒙古典型草原区土地利用动态变化及其对水质的影响

项颂, 庞燕, 杨天学, 刁兆岩

引用本文:

项颂, 庞燕, 杨天学, 刁兆岩. 内蒙古典型草原区土地利用动态变化及其对水质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(4): 857-867.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0817>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

太湖平原地区不同土地利用类型对水质的影响

高斌, 许有鹏, 王强, 杨洁, 沈顺忠, 徐兴

农业环境科学学报. 2017, 36(6): 1186-1191 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1511>

土地利用变化与社会经济因素对湖南典型水库水质变化的影响

杨泽栋, 秦治恒, 白中科, 郝易成

农业环境科学学报. 2018, 37(10): 2270-2277 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1754>

磷酸铵镁堆肥产品养分释放特性及其肥效研究

李丹阳, 元传仁, 卫亚楠, 李国学

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 2066-2073 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0186>

亚热带源头流域梯级池塘氮磷含量的时空变异及其影响因素

申雅莉, 周脚根, 彭佩钦, 吴金水

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2420-2428 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1257>

基于CLUE-S的香溪河土地利用变化预测与总磷污染负荷分析

王清睿, 刘瑞民, 门聪, 郭力嘉

农业环境科学学报. 2018, 37(4): 747-755 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1500>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

项颂, 庞燕, 杨天学, 等. 内蒙古典型草原区土地利用动态变化及其对水质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(4): 857–867.
XIANG S, PANG Y, YANG T X, et al. Land use change and its effects on water quality in typical steppe region of the Inner Mongolia
Autonomous Region, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(4): 857–867.



开放科学 OSID

内蒙古典型草原区土地利用动态变化及其对水质的影响

项颂, 庞燕*, 杨天学, 刁兆岩

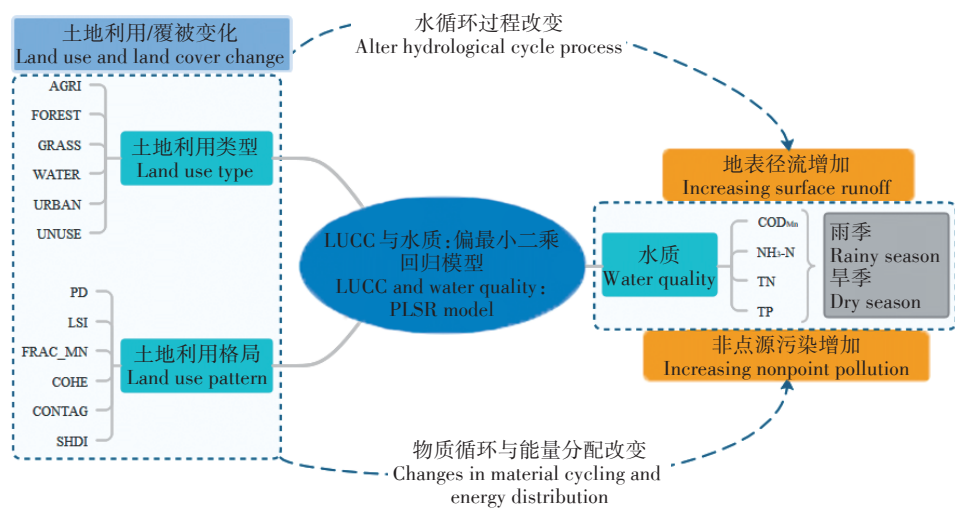
(中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要:探讨流域土地利用变化及其水质效应, 有利于从源头控制水污染。以内蒙古自治区典型草原区河流海拉尔河为研究对象, 综合 GIS 技术、多元统计及偏最小二乘回归模型, 对 2005—2015 年间流域土地利用的动态变化及其对水质的影响进行分析。结果表明, 2005—2015 年研究区各土地利用类型面积发生较大变化, 其中草地面积大幅锐减、水域面积明显萎缩, 而林地、农田、城镇

用地、未利用地面积增多, 特别是在中上游流域土地利用类型变化较明显; 土地利用格局整体呈现景观破碎化程度加剧、形状趋于复杂化、多样性增加、聚集度减弱的趋势, 下游流域土地利用格局变化较明显。海拉尔河中上游水质基本满足环境功能区要求, 下游水质污染物浓度大幅升高, 高锰酸盐指数(COD_{Mn})全年超标, 研究时段内河流水质总体平稳改善。偏最小二乘回归模型显示, 与水质呈显著正相关的主要土地利用指标为凝聚度(COHE)、蔓延度指数(CONTAG), 负相关指标为农田面积占比(AGRI)、香农多样性指数(SHDI), 主要水质污染指标 COD_{Mn}对土地利用的显著响应均出现在雨季。研究表明, 土地利用变化是影响区域非点源污染的重要因素, 是海拉尔河有机污染的驱动因子之一, 建议加强区域土地利用空间管控。

关键词:土地利用; 景观格局; 水质效应; 偏最小二乘回归模型

中图分类号: S812; F321.1 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2022)04-0857-11 doi:10.11654/jaes.2021-0817



Land use change and its effects on water quality in typical steppe region of the Inner Mongolia Autonomous Region, China

XIANG Song, PANG Yan*, YANG Tianxue, DIAO Zhaoyan

(National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological Restoration, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: The study of land use change and its effects on water quality is essential for controlling water pollution at the source. Using GIS

收稿日期: 2021-07-18 录用日期: 2021-12-14

作者简介: 项颂(1988—), 女, 湖北黄冈人, 硕士, 从事湖泊保护与富营养化防治研究。E-mail: 1140659723@qq.com

*通信作者: 庞燕 E-mail: 190068749@qq.com

基金项目: 国家水体污染控制与污染治理科技重大专项(2017ZX07301006006)

Project supported: The National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (2017ZX07301006006)

technology, multi-statistics, and a partial least squares regression model, the changes in land use and their impact on water quality from 2005 to 2015 were analyzed in the Hailar River, a typical grassland river in the Inner Mongolia Autonomous Region. The results showed that significant changes in land use types occurred in the middle and upper basins, and grassland area and water area decreased sharply, while forest area, farmland area, urban land area, and unused land area increased. Furthermore, the land use pattern presented increasing landscape fragmentation, complexity, diversity, and a trend of decreasing aggregation, especially in the downstream catchment. The water quality of the Hailar River improved steadily during the study period. Water quality in the middle and upper reaches met the functional environmental requirements but deteriorated significantly downstream, where the permanganate index (COD_{Mn}) exceeded the standard throughout the year. The partial least squares regression model revealed that the key land use indicators showing predominantly positive relationships with water quality concentration were the cohesion index (COHE) and contagion index (CONTAG), while the proportion of farmland area (AGRI) and Shannon's diversity index (SHDI) showed negative relationships. Moreover, the most dominant pollutant parameter, COD_{Mn} , was sensitive to land use change during the rainy season. This implies that land use change was an important factor influencing regional non-point source pollution and one of the driving factors of organic pollution in the Hailar River, suggesting that spatial control of regional land use should be strengthened.

Keywords: land use; landscape pattern; water quality effect; partial least squares regression model

土地利用/覆被变化(Land use and cover change, LUCC)作为全球环境变化的重要原因,是人类可持续发展和全球环境变化研究的核心主题之一^[1]。土地利用/覆被变化的环境效应表现在对气候、土壤、水文、生态系统等生态环境要素的影响上^[2],研究表明LUCC是影响非点源污染最关键的因素之一,通过改变地表水文循环过程,增加营养盐、重金属及悬浮物的入河通量,造成水体富营养化和水污染^[3-4]。因此,在当前地表水体污染严重、湖泊水库藻华频发的背景下^[5],探讨LUCC与地表水水质的内在联系,对非点源污染控制有重要意义^[6-7]。

LUCC对水质的影响,一方面是土地利用类型的变化导致地表水文循环过程改变,从而间接地对河流水质产生影响^[8-10],已有研究表明不同土地利用类型对水质的影响不同,单一地类中以农业用地和建设用地的影响最大^[11-13]。另一方面土地利用格局变化会引起景观中物质循环和能量分配的改变,影响养分等非点源污染物发生、迁移和转化过程,从而影响区域水质^[14-15]。一般采用景观指数来反映景观单元类型及其空间布局的变化^[16-17]。鉴于水土耦合系统的复杂性,研究多采用数学模型进行土地利用与水质的定量研究,早期主要采用经验模型^[18],随着计算机技术及3S技术的发展,最小二乘回归(OLS)、地理加权回归(GWR)、逐步多元回归(SMR)、主成分分析(PCA)等统计模型逐渐兴起^[3-4,10-11],这些多元统计模型在进行水土关联分析时能给出定量结果,但仍存在一些问题,主要是大部分土地利用指标间存在高度共线性,违背了多元回归模型解释变量间不相关的古典假设,

带来冗余信息,使模型评估失真或者不准确^[19]。偏最小二乘回归(PLSR)在普通多元回归的基础上,结合了主成分分析(PCA)和典型相关分析(CCA)的思想,解决了回归分析中自变量多重共线性的问题,特别当两组变量个数较多且都存在多重相关性,而样本量又较少时,用偏最小二乘回归建立的模型具有传统经典回归分析等方法所没有的优点^[20]。现有研究产生了大量有益的成果,但针对水土复合系统联动机理方面的研究仍较为薄弱,两者时空耦合的研究也较少;研究尺度主要集中于特定区域,而区域的特异性和指标的各异性使得结果难以比较,较难形成统一的结论;分析手段仍以传统统计模型为主,可广泛推广应用的科学方法尚未完全建立。

海拉尔河作为我国北方重要生态安全屏障——呼伦贝尔草原的生命之源,是地区经济持续发展和流域人民赖以生存的基础^[21]。已有研究^[22-24]发现,近年来,由于自然过程和人类活动的影响,海拉尔河流域生态环境遭到破坏,面临草地退化、土地沙化、水土流失、水污染等环境问题。针对流域日益凸显的生态环境问题,地方政府启动了退耕还林还草、三北防护林建设、水污染防治等专项工作,但传统以畜禽养殖为主的生产生活方式无法快速根本转变,农业非点源污染问题仍然突出,流域生态环境并未完全好转。因此,针对流域现状问题,本文从土地利用的角度揭示2005—2015年间海拉尔河流域土地利用和水质的变化,采用偏最小二乘回归分析二者的耦合关系,以期为流域农业面源污染控制、环境保护决策的科学制定、自然资源合理利用提供科学支撑,也为流域经济、资源、

环境的协调发展提供理论指导。

1 材料和方法

1.1 研究区概况及水质断面设置

海拉尔河流域($117^{\circ}48'30''\sim 122^{\circ}28'5''E$, $47^{\circ}32'30''\sim 50^{\circ}16'2''N$)位于内蒙古自治区呼伦贝尔市西南部,流域面积5.48万 km^2 。流域属中温带半湿润半干旱大陆性季风气候,多年年均气温和降水量分别为 5.34°C 和348 mm,降雨主要集中在6—9月,占全年降雨总量的80%。流域最大的河流海拉尔河干流全长1 430 km,自东向西流经牙克石市、海拉尔区、陈巴尔虎旗、新巴尔虎左旗,汇入额尔古纳河,河流两岸森林、草原、煤炭等资源丰富,其主要支流有免渡河、伊敏河等(图1)。海拉尔河流域是呼伦贝尔市人口、经济以及产业聚集区,也是内蒙古自治区重要的能源、畜牧业和林业基地,因此保护好流域水环境对区域社会经济发展意义重大^[23-24]。

海拉尔河主体为地表水Ⅲ类水环境功能区,发源于有机质背景值高的大兴安岭林区,上游地形起伏大,河谷呈“V”形,两岸主要分布有原始林和次生林。自牙克石市以下,河流进入高平原,横贯呼伦贝

尔大草原,河流中游流经牙克石市、海拉尔区,人类活动密集。到与伊敏河汇合处以下,地势开阔平坦,处于河流下游。根据海拉尔河地理条件、水文特征以及周边土地利用分布差异,海拉尔河现有水质监测点分布如下:上游设有八号牧场(BHMC)、大屯桥(DTQ)断面,中游设有牙克石(YKS)断面,下游设有五牧场(WMC)、陶海(TH)、嵯岗(CG)断面,水质监测断面分布见图1。

1.2 数据来源

DEM为中国科学院计算机网络信息中心 ASTER GDEM 30 m分辨率高程数据,流域2005年、2010年和2015年的遥感影像来自中国科学院计算机网络信息中心 Landsat8 卫星数据。

水质数据来源于2005—2015年海拉尔河6个监测点,由呼伦贝尔市水质监测站提供,样品采集及分析测试方法参照《水和废水监测分析方法(第4版)》。基于已有河流污染现状研究^[23-25],选取高锰酸盐指数(COD_{Mn})、总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)为分析参数,依据区域季节性变化和水文特征,将参数划分为雨季(6—9月)和旱季(10—12月、1—5月)进行分析。多年(1981—2010年)降雨量数据来源为中国气

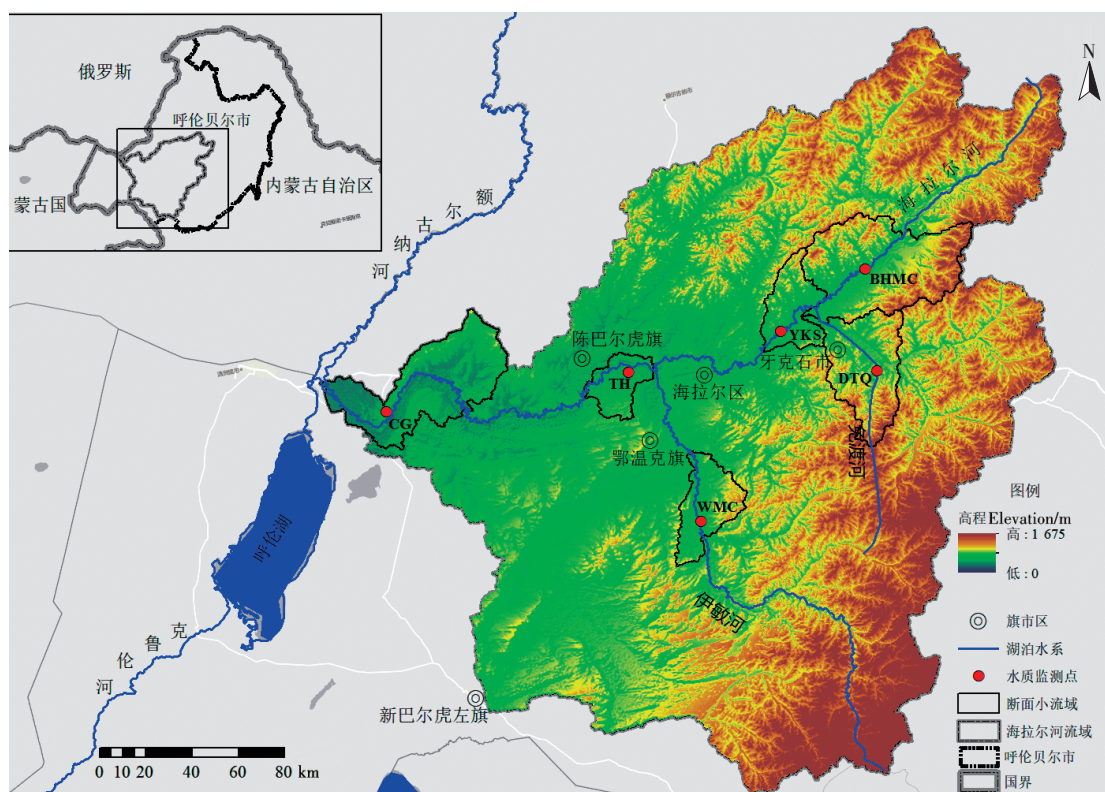


图1 研究区及监测点分布

Figure 1 Study area and its monitoring sites

象数据网。

1.3 数据处理

1.3.1 空间分析

采用 ArcGIS 10.4(ESRI)平台,结合监测点的位置,基于流域 DEM 将流域划分为 6 个断面小流域^[20,26](图 1);基于 2005 年、2010 年和 2015 年的遥感影像,参照最新土地分类标准《土地利用现状分类》(GB/T 21010—2007),采用非监督分类法进行土地利用分类,并结合现场踏勘进行修正,最终将 3 个时期的土地利用统一分为农田(AGRI)、林地(FOREST)、草地(GRASS)、水域(WATER)、城乡工矿居民用地(URBAN)、未利用地(UNUSE)6 类(表 1),其中城乡工矿居民用地包括城镇建设用地、农村聚落、工业和交通建设用地。不同监测断面流域土地利用类型见图 2。

选用土地利用类型面积百分比表征土地利用类型组分,选用斑块密度(PD)、景观形状指数(LSI)、分维度

数(FRAC_MN)、凝聚度(COHE)、蔓延度指数(CONTAG)、香农多样性指数(SHDI)这 6 个景观指数表征土地利用空间格局(表 1),通过 Fragstats 4.2 得到各景观指数值。基于马尔科夫模型,利用 ArcGIS 10.4(ESRI)计算土地利用转移矩阵,定量揭示土地利用变化规律。

1.3.2 统计分析

利用 SPSS 25 进行数据异常值排除和标准化去量纲后对河流水质数据进行描述性统计分析;在 0.05 的显著性水平下进行水质数据的 K-S 正态性检验,基于检验结果选用非参数 Kruskal-Wallis 检验进行水质数据的季节性差异分析。在偏最小二乘回归(PLSR)之前,采用 Person 相关性分析对自变量进行共线性诊断,经分析发现 PLSR 模型多个自变量间相关系数均大于 0.9,存在较严重的多重共线性,加之样本数少于变量个数,故采用偏最小二乘回归法分析河流水质与土地利用的关联,建模后采用留一交叉验证法确定因

表 1 土地利用指标概况
Table 1 Descriptions of selected variables for land use

变量 Variate	缩写 Abbreviation	描述 Description
土地利用类型	农田	AGRI
	林地	FOREST
	草地	GRASS
	水域	WATER
	城乡工矿居民用地	URBAN
	未利用地	UNUSE
土地利用格局	斑块密度	PD
	景观形状指数	LSI
	分维度数	FRAC_MN
	凝聚度	COHE
	蔓延度指数	CONTAG
	香农多样性指数	SHDI

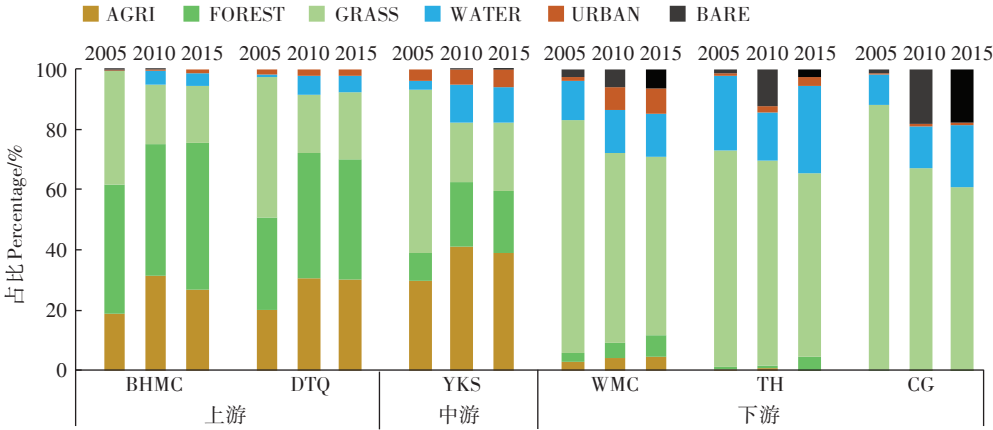


图 2 不同监测断面流域土地利用类型组成
Figure 2 Land use compositions in different monitoring sectional watersheds

子个数。

2 结果与分析

2.1 土地利用特征

2.1.1 土地利用空间分布

2005、2010年和2015年研究区的土地利用状况如图2所示,优势地类为草地、林地、农田。土地利用空间分布差异明显,上游流域主要分布有林地和耕地,占比分别为30%~48%、19%~31%;中游流域主要为耕地,占比为30%~41%;下游流域主要为草地,占比为60%~88%。

2.1.2 土地利用类型变化

10 a间研究区主要土地利用类型转移矩阵如表2所示。2005—2015年,研究区草地面积大幅锐减,减少1 713.74 km²,未利用地面积增加1 067.18 km²;其次是农田开垦和林地面积扩大,两者面积分别增加396.90 km²、382.96 km²,再次是水域萎缩251.04 km²,城镇用地扩张117.72 km²。2005—2010年、2010—2015年,研究区土地利用类型变化规律与整体10 a的变化趋势基本一致,但2005—2010年水域面积扩大,2010—2015年农田面积减少。空间上,中上游流域草地锐减现象明显,农田和林地面积增多;下游流域草地锐减,未利用地面积增多,水域萎缩,总体上游流域土地利用类型变化更明显。

2.1.3 土地利用格局变化

2005—2015年研究区土地利用格局如图3所示,10 a间研究区土地利用景观格局变化主要表现为PD、LSI、FRAC_MN、SHDI值升高,CONTAG、COHE值降低。2005—2010年研究区土地格局变化规律与10 a整体的变化规律较一致,但2010—2015年则略有不同,主要表现为COHE值升高。空间上,中上游八号

牧场、大屯桥、牙克石流域的PD、LSI、FRAC_MN、SHDI值较高,下游五牧场、陶海、嵯岗流域的CONTAG、COHE值较高。

2.2 河流水质特征

2.2.1 河流水质时空变化特征

参照地表水Ⅲ类水环境功能区要求,海拉尔河上游水质基本满足要求,下游断面出现TN、COD_{Mn}超标现象(图4)。季节性变化显示,TN、TP、NH₃-N浓度在海拉尔河上游均呈现雨季高于旱季的现象,在中下游则相反;COD_{Mn}浓度均为雨季高于旱季。空间上,河流水质指标自上游至下游浓度升高,尤其是下游段水质污染物浓度大幅升高。水质差异性分析显示,在0.05的显著性水平下,TN、NH₃-N浓度在下游断面季节性差异显著,TP浓度上游断面季节性差异显著,COD_{Mn}浓度各断面均存在显著季节性差异。

2.2.2 河流水质变化趋势

2005—2015年海拉尔河水质变化趋势如图5所示,10 a间河流水质指标浓度整体降低,水质改善,其中TN、TP、NH₃-N浓度在2005—2010年、2011—2015年均呈降低趋势,且下降幅度较2005—2015年大。

2.3 土地利用与水质的关联分析

2.3.1 成分提取

首先采用留一交叉验证法确定最优因子数,当PLSR模型在不同主成分个数下对应的预测均方根误差(RMSEP)相对小时,结合各因子对因变量的累计贡献率,确定最终的因子数(表3)。

2.3.2 回归模型建立

3个时段土地利用与水质指标的偏最小二乘回归系数如表4所示。由表4可知,对水质影响显著的主要正相关指标为COHE、CONTAG,负相关指标为AGRI、SHDI。水质对土地利用的响应存在季节性差

表2 2005—2015年研究区土地利用类型转移矩阵(km²)

Table 2 Land use type transfer matrix in the study area during 2005—2015

土地利用类型 Land use type	2005—2010			2010—2015			2005—2015			净值 Net value
	上游 Upstream	中游 Midstream	下游 Downstream	上游 Upstream	中游 Midstream	下游 Downstream	上游 Upstream	中游 Midstream	下游 Downstream	
AGRI	421.99	80.97	13.16	-104.73	-14.34	-0.12	317.23	66.63	13.04	396.90
FOREST	172.81	83.50	17.08	78.84	-6.24	37.01	251.63	77.24	54.09	382.96
GRASS	-775.89	-239.6	-555.63	32.93	19.31	-194.84	-742.97	-220.30	-750.47	-1 713.74
WATER	168.36	68.47	45.01	-181.80	-83.25	-267.85	-13.44	-14.77	-222.83	-251.04
URBAN	13.01	6.55	58.95	14.46	8.10	16.66	27.47	14.64	75.61	117.72
UNUSE	-0.26	0.13	421.42	160.34	76.43	409.14	160.08	76.56	830.54	1 067.18

注:正值代表土地利用转入,负值代表土地利用转出。

Note: Positive values indicate land use transfer in, and negative values indicate land use transfer out.

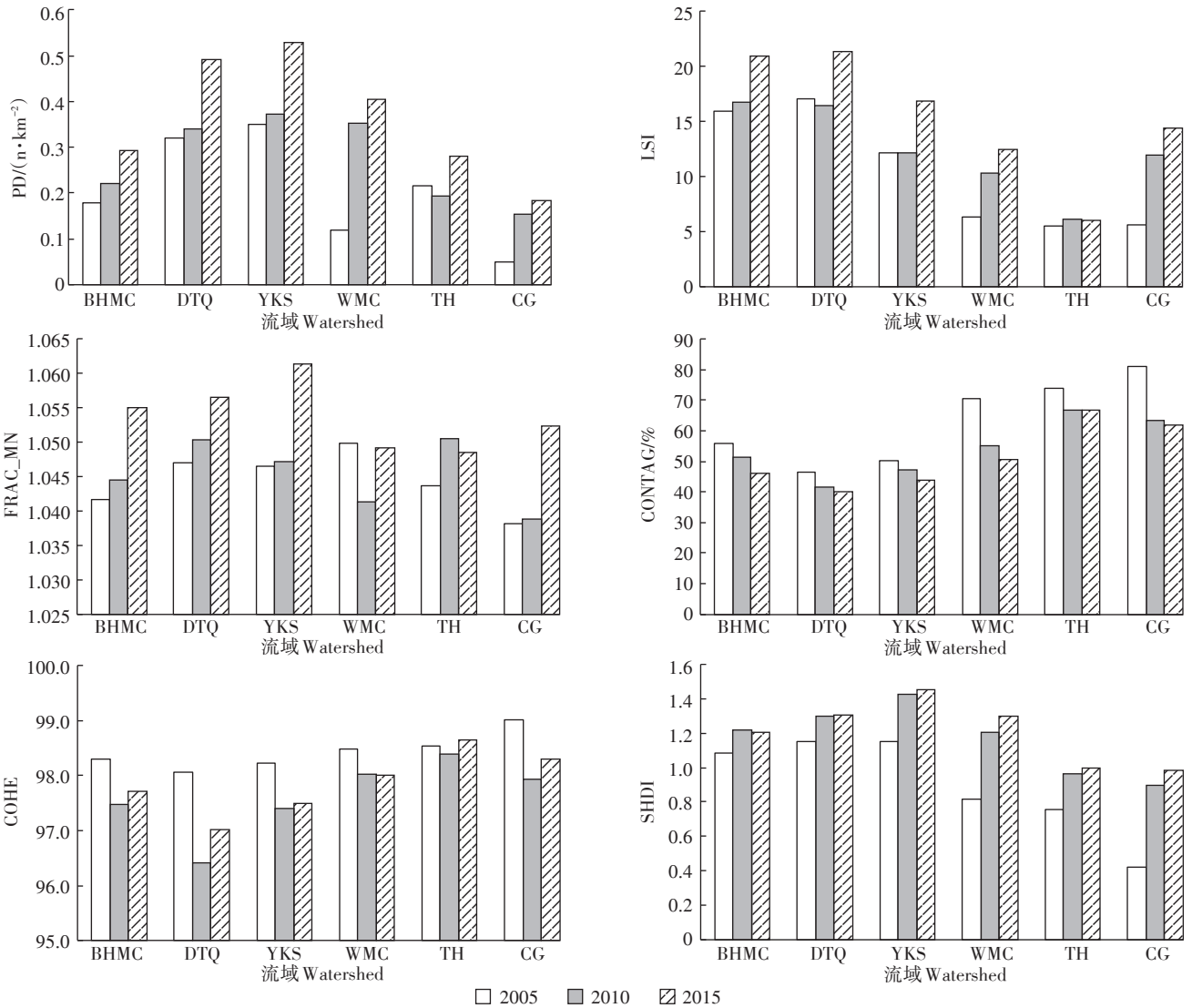


图 3 不同监测断面流域土地利用空间格局
Figure 3 Land use spatial pattern in different monitoring sectional watersheds

表 3 初步偏最小二乘回归累计方差贡献率

Table 3 Cumulative percent of variance of partial least squares regression										
年份 Year	最优因子数 The optimal number of factors	X	雨季 Rainy season				旱季 Dry season			
			TN	TP	COD _{Mn}	NH ₃ -N	TN	TP	COD _{Mn}	NH ₃ -N
2015 年	1	59.04	52.39	85.52	54.31	46.97	86.11	86.49	0.03	68.82
	2	79.25				60.45		92.45	47.73	
2010 年	1	53.76	76.15	67.50	24.27	69.80	32.61	90.22	31.07	89.90
	2	76.64			55.67		79.29		66.37	
2005 年	1	69.41	57.83	46.04	71.76	27.51	33.68	64.84	47.32	65.18
	2	84.65	88.08	83.38		81.85	75.28	99.18	50.43	

异,水质显著响应指标在 2015 年为雨季 COD_{Mn}和旱季 TN,2010 年为雨季 NH₃-N 和旱季 TP,2005 年为雨季 COD_{Mn} 和旱季 NH₃-N,其中水质主要污染指标 COD_{Mn}对土地利用的显著响应出现在雨季。

3 讨论

3.1 土地利用动态变化

研究发现,10 a 间受人类活动影响,研究区优势

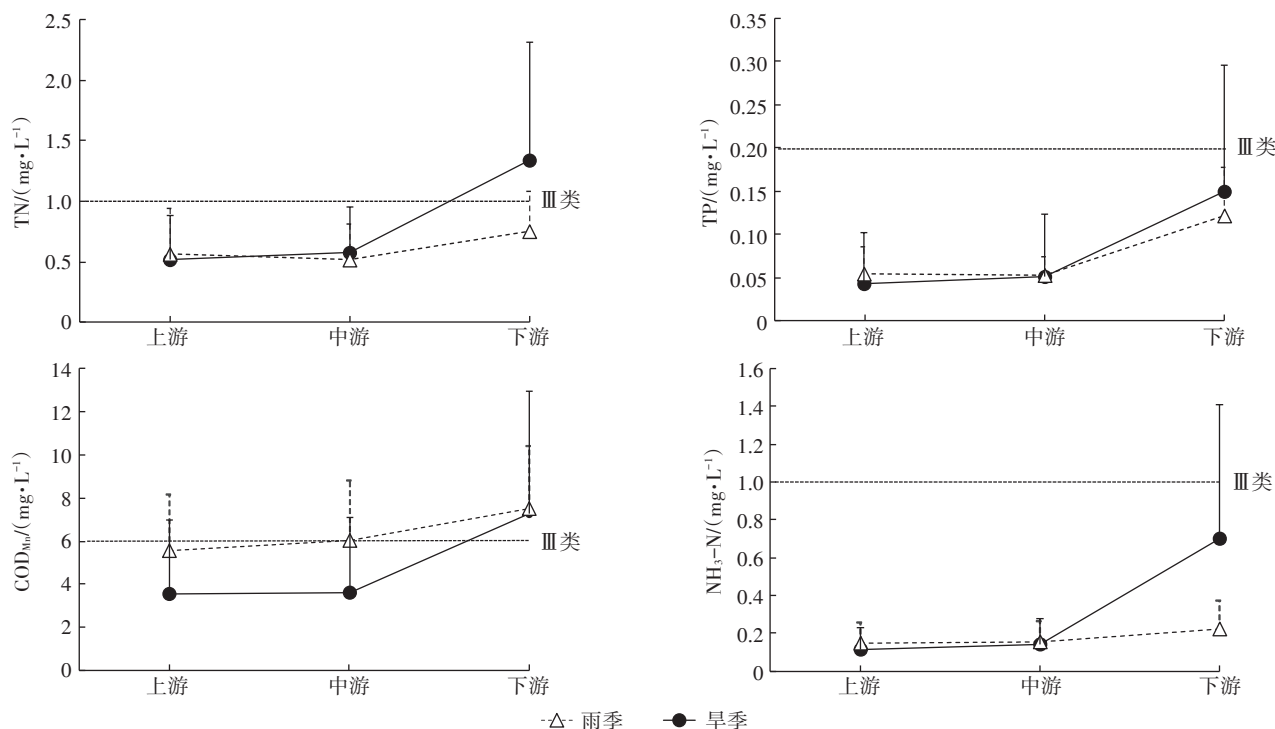


图4 河流水质时空变化

Figure 4 Spatial-temporal variation of river water quality

地类草地大幅锐减,林地和农田面积增加。王治良等^[27]针对呼伦贝尔草原区的研究也发现2000—2010年草原减少、耕地增加、林地减少,分析造成草原减少的主要原因,可能是人类活动导致草地被大量侵占,另外在区域气象、植被特征以及人类过度放牧、牲畜踩踏的多重影响下,草地沙化面积加大。耕地对其他生态用地的挤占,虽然一定程度上受限于区域实施的退耕还草等生态工程,但在目前政策对耕地的保护和耕地开垦的经济利益驱使下,耕地面积仍呈增加趋势。呼伦贝尔草原区林地面积减少主要是由2006年鄂温克红花尔基特大火灾导致,由于本研究区不涉及到火灾区,且退耕还林、三北防护林建设等工程的实施使流域林地面积增加。流域水域萎缩、未利用地增多、城镇扩张等现象也有发生,这主要受区域社会经济发展及人口增长的影响。

土地利用格局整体呈现景观破碎化程度加剧、形状趋于复杂化、聚集度减弱、多样性增加的趋势,其中景观形状及多样性的变化趋势同王治良等^[27]的研究一致,破碎化及黏合度的变化趋势与李攀^[22]的研究一致,这说明一方面流域社会经济发展下人类活动对土地的不合理利用仍在继续,另一方面实施的草原生态保护工程等相关环保政策也在发挥效益,此外地形、气象等自然驱动因素也对其有一定影响。

此外,本研究发现不同空间区域土地利用变化存在差异,牙克石市及以上的区域人类活动干扰相对少,多受自然因素影响,以土地利用类型变化为主,而下游区域海拉尔区为人类活动密集区,对土地空间分布格局影响较大。因此,在流域水环境治理时应统筹考虑山水林田湖草的综合空间管控,仍应以林地扩增、草地和农田均衡发展为主要宗旨,同时制定中上游自然修复、下游综合治理的分类保护策略。

3.2 水质变化

本研究发现2005—2015年海拉尔河水质主要污染指标为COD_{Mn},在河流下游断面全年超标,且雨季浓度高,这与前期的研究结论^[23-25]类似。海拉尔河水质的时空差异是区域气象、水文及人为活动的综合体现,海拉尔河属降水和融雪补给型河流,它发源于大兴安岭林区,该区域土壤有机质背景值较高,当进入融雪期(5月),冰雪迅速融化,形成大量山洪,尤其在6—9月降雨期,降雨沿途冲刷腐殖质入河,有机污染加重;加之干流下游流经牙克石市、海拉尔区等人类活动密集区,由此产生的外来污染物入河更加重了水体有机污染。

研究时段内河流水质整体呈好转趋势,这与人类活动下土地利用类型及格局转变的复合效应有关,主要是由于优势地类草地大幅锐减、林地面积增加,分

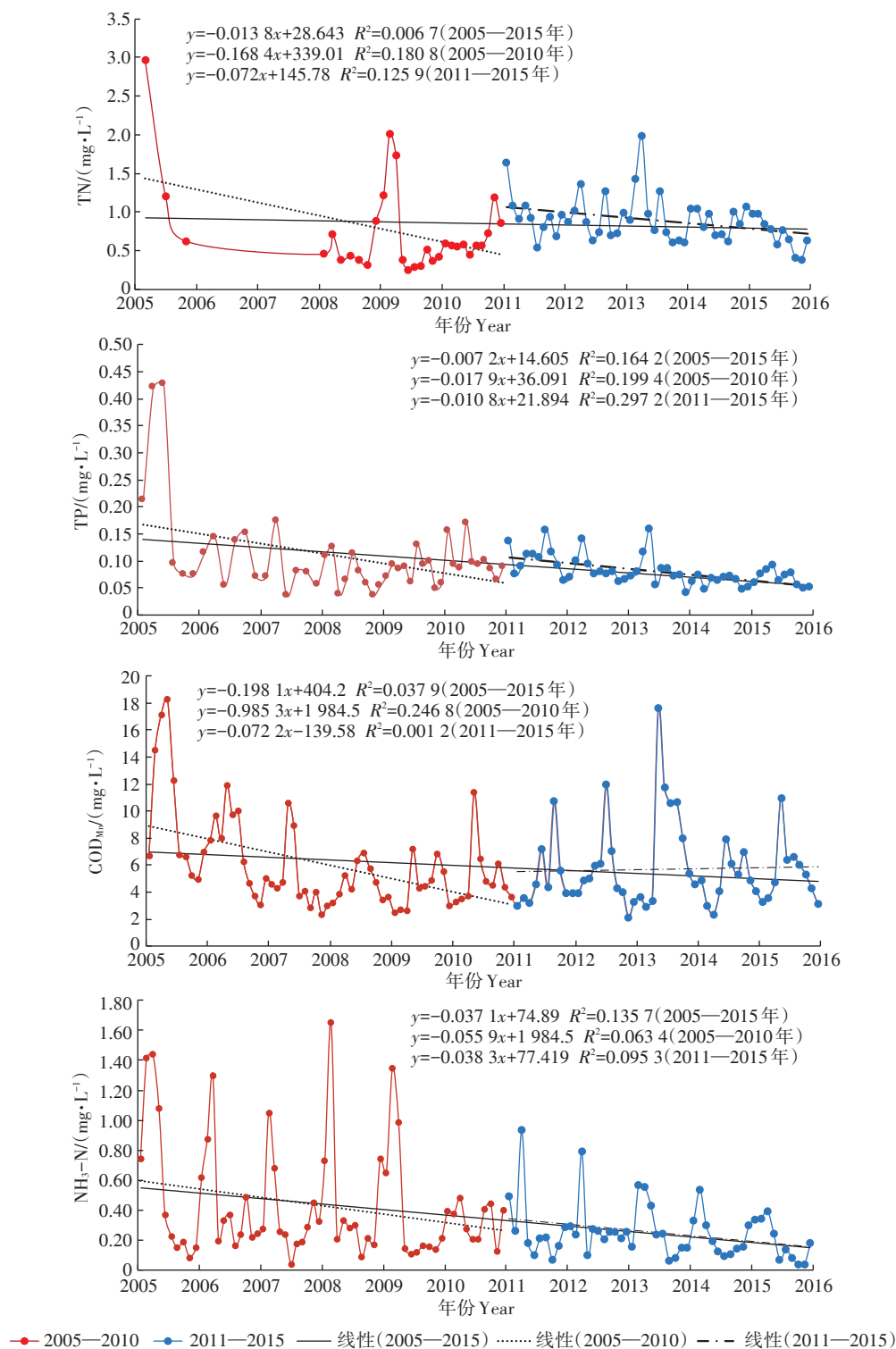


图5 河流水质年际变化

Figure 5 Interannual variations of river water quality

布格局整体呈现破碎化程度加剧、聚集度减弱、多样性增加的趋势,一方面会减少区域畜禽养殖等农业非点源污染物产排及入河量,增加植被覆盖率,提升对入河污染物的拦截、净化能力;另一方面,区域土地利用分布越分散,对水质调节功能的类型越丰富,越有

利于污染物的逐步削减,从而减轻河水污染^[22]。水质的变化与区域环保工程的实施密不可分,自2003年以来地方政府加强了海拉尔河的保护与治理,在海拉尔河干流设置了国家和省级监测点,开展水质常规监测;同时在流域启动了环保专项整治,大力开展天然

表4 2005、2010、2015年不同季节土地利用与水质指标的回归系数

Table 4 Regression coefficients between land use variables and water quality in the wet and dry seasons of 2005, 2010, and 2015

年份 Year	土地利用类型 Land use type	雨季 Rainy season				旱季 Dry season			
		TN	TP	COD _{Mn}	NH ₃ -N	TN	TP	COD _{Mn}	NH ₃ -N
2015年	AGRI	-0.091	-0.112	-0.093			-0.162*		
	FOREST								
	GRASS								
	WATER		0.074						0.066
	URBAN								
	UNUSE								
	PD		-0.107*			-0.110			-0.078
	LSI			-0.105					
	FRAC_MN			-0.104*			-0.142*		
	COHE		0.133	0.110*		0.137			
	CONTAG			0.120			0.148		
	SHDI	-0.084		-0.085*		-0.137			
2010年	AGRI				-0.116*		-0.127	-0.189	
	FOREST				-0.099				
	GRASS								
	WATER								
	URBAN								
	UNUSE	0.095	0.087						
	PD		-0.086*				-0.104		
	LSI					-0.238		-0.220	
	FRAC_MN								
	COHE				0.133*	0.151	0.145*		0.146
	CONTAG				0.110	0.232	0.121*		
	SHDI	-0.129	-0.117*		-0.130		-0.142*		-0.142*
2005年	AGRI			-0.098*			-0.147*		
	FOREST			-0.084			-0.149		
	GRASS			0.086*					0.083*
	WATER								
	URBAN								
	UNUSE			0.063*					
	PD								-0.060*
	LSI			-0.102		-0.145	-0.164**		
	FRAC_MN								-0.053
	COHE	0.107**	0.098	0.105*			0.081*		0.100*
	CONTAG			0.091*					0.087**
	SHDI			-0.096*					-0.092**

注:表中各指标样本数为6,**表示在0.01水平显著相关,*表示在0.05水平显著相关。

Note: The sample number for each parameter in table is 6, ** represents significant correlation at 0.01 level, * represents relatively significant correlation at 0.05 level.

林保护、草原生态修复、沙区综合治理、畜禽养殖污染防治等工程,取得了较好的环境效益^[25,28]。后续应继续积极推进河流水生态保护与修复相关工程,在采取修复措施时,除考虑河流自身水质状况,还应考虑河流周边生态空间对河流生态系统的协同效应。同时

由于表征流域有机物污染的指标 COD_{Mn} 存在显著的季节性差异,气象、水文等自然条件的作用也应进一步研究。

3.3 土地利用与水质的关联

强烈的人类活动下土地利用变化对水质的作用

明显,且不同土地利用类型对水质的影响各异。已有研究表明,农田与水质的关系受研究区坡度、地形、耕作方式、种植模式等自然和人为因素的综合影响,呈现出复杂的耦合关系^[13,26,29]。本研究发现,农田面积百分比(AGRE)与河流多项水质呈显著负相关,这与JOHNSON等^[12]、SLIVA等^[30]和DAI等^[31]的研究结论一致,主要是由于海拉尔河流域农业活动以传统畜禽养殖业为主,农田面积小而散,且化肥施用少,农田内作物对污染物的截留吸附作用大于种植活动对水质的负效应,因此呈现出综合正效应。作为流域的优势地类,林草地在2005年对水质的影响作用较显著,林地主要发挥拦截污染物、净化水质的作用,而草地作为流域畜禽养殖业的生产生活载体,是污染产生的源区,随着流域土地利用的变化,林草地对水质的作用逐渐减弱,2015年两者与水质的关系均不显著。此外受区域社会经济发展所限,区域城镇化程度低,由此产生的水质效应也不显著。

河流作为景观的重要组成部分,其水质受到流域土地利用景观格局的影响^[15,17]。研究发现COHE、CONTAG、SHDI是对水质有显著影响的景观指标,COHE、CONTAG对水质有显著负效应,SHDI则相反。COHE是反映斑块类型之间物理连通性的指标,其值越大,表明斑块之间的连通性越好;CONTAG表征景观破碎程度,高CONTAG值意味着景观斑块较为集中;SHDI从斑块的分布均衡程度和类型两方面反映了景观异质性和多样性,高SHDI值表明景观多样性高,异质性大^[14,16]。本研究结果表明,斑块间的高连通性有助于污染物的迁移,由于流域畜禽养殖业发达,优势地类牧草地越集中,畜禽养殖产生的污染也越集中,排放入河强度更大,水质污染更重;而当流域优势地类草地的控制作用减弱,地类多样性更丰富,分布更均衡,水体受到的污染减轻,水质变好。这与李艳利等^[32]、孙芹芹等^[33]的研究结论一致,却与LEE等^[34]、XIAO等^[35]的研究结论不符。

由于土地利用类型与格局的复杂性,虽然土地利用变化对水质存在较为明显的影响,但两者耦合关系仍具有不确定性^[12,36],后续研究还需从两者的空间依赖性、不同类型区域指标选取的科学性等方面进一步研究。此外研究发现河流主要污染因子COD_{Mn}对土地利用的显著响应均出现在雨季,进一步验证了土地利用变化是影响区域非点源污染的重要因素,是海拉尔河有机污染的驱动因子之一,因此后续制定海拉尔河水质改善、农业面源防治策略时,建议加强土地利

用空间管控。

4 结论

(1)2005—2015年间,研究区草地面积锐减,其次农田开垦增加、林地面积扩大、水域萎缩现象明显,城镇用地也存在扩张;土地利用格局整体呈现景观破碎化程度加剧、形状趋于复杂、聚集度减弱但多样性增加的趋势;中上游流域以土地利用类型变化为主,下游流域以土地分布格局变化为主。

(2)2005—2015年间海拉尔河中上游水质基本满足水功能区要求,下游水质较差,主要污染指标COD_{Mn}全年超标,但10 a间河流水质整体呈改善趋势。

(3)对水质影响显著的主要土地利用正相关指标为COHE、CONTAG,负相关指标为AGRI、SHDI。水质对土地利用的响应存在季节性差异,主要污染指标COD_{Mn}对土地利用的显著响应均出现在雨季。

参考文献:

- [1] 李秀彬. 全球环境变化研究的核心领域, 土地利用/土地覆被变化的国际研究动向[J]. 地理学报, 1996, 51(5): 523-557. LI X B. A review of the international researches on land use/land cover change[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1996, 51(5): 523-557.
- [2] YILMAZ Y A, SEN O L, TURUNCOGLU U U. Modeling the hydroclimatic effects of local land use and land cover changes on the water budget in the upper Euphrates-Tigris basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 576: 596-609.
- [3] MESSINA N J, COUTURE R M, NORTON S A, et al. Modeling response of water quality parameters to land-use and climate change in a temperate, mesotrophic lake[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 713, 136549.
- [4] BUCAK T, TROLLE D, TAV Ş ANOĞLU Ü N, et al. Modeling the effects of climatic and land use changes on phytoplankton and water quality of the largest Turkish freshwater lake: Lake Beyşehir[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 621, 802-816.
- [5] WALKER D B, BAUMGARTNER D J, GERBA C P, et al. Surface water pollution[M]//Environmental and pollution science. San Diego: Academic Press, 2019, 261-292.
- [6] SHARPLEY A N, SMITH S J, WILLIAMS J R. Nonpoint source pollution impacts of agricultural land use[J]. *Lake and Reservoir Management*, 1988, 4(1): 41-49.
- [7] 李俊然, 陈利顶, 郭旭东, 等. 土地利用结构对非点源污染的影响[J]. 中国环境科学, 2000, 20(6): 506-510. LI J R, CHEN L D, GUO X D, et al. Effects of land use structure on non-point source pollution[J]. *China Environmental Science*, 2000, 20(6): 506-510.
- [8] GIRI S, QIU Z Y. Understanding the relationship of land uses and water quality in Twenty First Century: A review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 173: 41-48.
- [9] RISAL A, PARAJULI P B, DASH P, et al. Sensitivity of hydrology and water quality to variation in land use and land cover data[J]. *Agriculture*

- al Water Management*, 2020, 241, 106366.
- [10] FERREIRA MARMONTEL C V, LUCAS-BORJA M E, RODRIGUES V A, et al. Effects of land use and sampling distance on water quality in tropical headwater springs (Pimenta creek, São Paulo State, Brazil) [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 622/623: 690-701.
- [11] LUO Z, SHAO Q, ZUO Q, et al. Impact of land use and urbanization on river water quality and ecology in a dam dominated basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 584: 124655.
- [12] JOHNSON L, RICHARDS C, HOST G, et al. Landscape influences on water chemistry in midwestern stream ecosystems[J]. *Freshwater Biology*, 1997, 37: 193-208.
- [13] MELLAND A R, FENTON O, JORDAN P. Effects of agricultural land management changes on surface water quality: A review of meso-scale catchment research[J]. *Environmental Science & Policy*, 2018 (84): 19-25.
- [14] FARINA A. Principles and methods in landscape ecology[M]. London: Chapman & Hall, 1998.
- [15] 邹建国. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 24-26. WU J G. Landscape ecology pattern: Process, scale and hierarchy[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 24-26.
- [16] TURNER M G. Spatial and temporal analysis of landscape patterns[J]. *Landscape Ecology*, 1990, 4(1), 21-30.
- [17] HUNSAKER C, LEVINE D, TIMMINS S, et al. Landscape characterization for assessing regional water quality[M]//MCKENZIE D, HYATT D, McDONALD J, et al. Ecological indicator. Essex: Elsevier, 1992: 997-1006.
- [18] ALBERTI M, BOOTH D, HILL K, et al. The impact of urban patterns on aquatic ecosystems: An empirical analysis in Puget lowland sub-basins[J]. *Landscape & Urban Planning*, 2007, 80: 345-361.
- [19] YAN B, FANG N F, ZHANG P C, et al. Impacts of land use change on watershed streamflow and sediment yield: An assessment using hydrologic modelling and partial least squares regression[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 484: 26-37.
- [20] AI L, SHI Z H, YIN W, et al. Spatial and seasonal patterns in stream water contamination across mountainous watersheds: Linkage with landscape characteristics[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 523: 398-408.
- [21] 潘学清, 魏绍成, 冯国钧. 中国呼伦贝尔草地[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1991: 25-31. PAN X Q, WEI S C, FENG G J. The Hulunbeier grassland of China[M]. Changchun: The Jilin Technology and Science Publishing House, 1992: 25-31.
- [22] 李攀. 海拉尔河流域景观分布格局变化及其驱动因子分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2011: 58. LI P. Landscape patterns change and driving factors of Hailar River watershed[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2011: 58.
- [23] 庞燕, 项颂, 杨天学, 等. 内蒙古海拉尔河水质污染时空变化特征[J]. 环境工程技术学报, 2019, 9(4): 414-420. PANG Y, XIANG S, YANG T X, et al. Spatial and temporal variation characteristics of water pollution in Hailaer River, Inner Mongolia[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, 9(4): 414-420.
- [24] 君珊, 白凯, 李魁, 等. 综合水质标识指数法在海拉尔河水质评价中的应用研究[J]. 环境科学与管理, 2017, 42(4): 171-176. JUN S, BAI K, LI K, et al. Application of comprehensive water quality identification index in water quality assessment of Hailaer River[J]. *Environmental Science and Management*, 2017, 42(4): 171-176.
- [25] 白光明. 额尔古纳河流域农业面源污染现状及防治对策[J]. 环境与发展, 2018(9): 22-23. BAI G M. Current status and prevention measures of agriculture non-point source pollution in Erguna basin [J]. *Environment and Development*, 2018(9): 22-23.
- [26] PRATT B, CHANG H. Effects of land cover, topography, and built structure on seasonal water quality at multiple spatial scales[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 209/210(4): 48-58.
- [27] 王治良, 路春燕. 呼伦贝尔草原区土地利用及景观格局变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(12): 91-97. WANG Z L, LU C Y. Dynamic change of land use and landscape pattern in Hulunbuir grassland, China[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(12): 91-97.
- [28] 荀彦平, 魏敬铤. 内蒙古“十一五”规划战略环境评价成果实效性分析[J]. 北方环境, 2013, 29(3): 1-4. XUN Y P, WEI J T. Analysis on the actual effect of strategic environmental assessment for the eleventh five-year plan of Inner Mongolia Autonomous Region[J]. *Northern Environmental*, 2013, 29(3): 1-4.
- [29] SMITH A P, WESTERN A W, HANNAH M C. Linking water quality trends with land use intensification in dairy farming catchments[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 476, 1-12.
- [30] SLIVA L, WILLIAMS D D. Buffer zone versus whole catchment approaches to studying land use impact on river water quality[J]. *Water Research*, 2001, 35(14): 3462-3472.
- [31] DAI X Y, ZHOU Y Q, MA W C, et al. Influence of spatial variation in land-use patterns and topography on water quality of the rivers inflowing to Fuxian Lake, a large deep lake in the plateau of southwestern China[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 99: 417-428.
- [32] 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[J]. 地球与环境, 2012, 40(4): 573-582. LI Y L, XU Z X, LI Y F. A preliminary study on the relationship between multi-scale land use and landscape and river water quality response in the Huntai watershed[J]. *Earth and Environment*, 2012, 40(4): 573-582.
- [33] 孙芹芹, 黄金良, 洪华生, 等. 基于流域尺度的农业用地景观-水质关联分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 54-59. SUN Q Q, HUANG J L, HONG H S, et al. Analysis on linkage between farm landscape and water quality in Jiulong River watershed[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(4): 54-59.
- [34] LEE S W, HWANG S J, LEE S B, et al. Landscape ecological approach to the relationships of land use patterns in watersheds to water quality characteristics[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2009, 92(2): 80-89.
- [35] XIAO H, JI W. Relating landscape characteristics to non-point source pollution in mine waste-located watersheds using geospatial techniques[J]. *Journal of Environmental Management*, 2007, 82, 111-119.
- [36] GRIFFITH J A, MARTINKO E A, WHISTLER J L, et al. Preliminary comparison of landscape pattern-normalized difference vegetation index (NDVI) relationships to central plains stream conditions[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31: 846-859.