

# 博斯腾湖不同时空尺度下土地利用景观格局对水质的影响

胡丛巧<sup>1</sup>, 迪丽努尔·阿吉<sup>1,2</sup>, 李茹霞<sup>1</sup>, 王晓兰<sup>1</sup>, 玉素甫江·如素力<sup>2</sup>

(1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 新疆 乌鲁木齐 830054;  
2. 新疆干旱区湖泊环境与资源重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830054)

**摘要:** 定量分析不同尺度半径范围内博斯腾湖景观格局对环境的影响, 为有效保护流域水质与生态管理提供科学依据。基于2020—2021年博斯腾湖平、丰、枯水期23个采样点的实测水质数据和Google Earth遥感数据, 结合冗余分析(RDA)和Spearman相关分析, 揭示不同时空尺度下土地利用景观格局对水质的影响。结果表明: (1) 博斯腾湖水体中COD<sub>Mn</sub>、TN浓度异常偏高, 分别有21.7%、55.1%的采样点超过地表水Ⅲ类水标准, 表明TN和COD<sub>Mn</sub>是其主要污染物; (2) 5种不同缓冲区半径内土地利用与水质呈现显著相关性, 丰、平、枯水期的1 000、3 000、500 m半径缓冲区对水质解释率最佳, 分别为40.0%、35.6%和31.1%; (3) 景观异质性特征与土地破碎化程度随空间尺度增大而增强; (4) 土地利用类型中, 耕地是水质恶化的主要污染输出源, 其次为草地, 尽管草地对净化水质起到积极作用, 但其不恰当的管理方式使污染物进入水中, 导致水质恶化; (5) 景观格局指数中, LSI(景观形状)与NH<sub>3</sub>-N、TN呈现正相关性, SHDI(香农多样性指数)与NH<sub>3</sub>-N呈显著正相关性, 表示随着景观破碎化程度增大, 水质恶化程度加剧, LSI与水质的关联存在着很大的不确定性, 仍需进一步探讨。

**关键词:** 时空尺度; 土地利用; 景观格局; 水质; 博斯腾湖

**中图分类号:** X522 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2025)01-0034-11

人类活动对生态环境的影响可通过土地利用类型及结构变化直接反映(贾亚男和袁道先, 2003), 是导致河流、湖泊水质恶化的重要原因之一(方娜等, 2019; 郝守宁等, 2020; 杨强强等, 2020; 赵玉, 2020), 同时, 不同时空尺度下的土地利用方式也会影响河流、湖泊水质的研究结果。李好好等(2022)研究发现湟水河平水期耕地面积占比与总氮、高锰酸盐指数浓度呈正相关, 与总磷浓度呈负相关; 城镇面积占比与污染物浓度基本呈正相关; 丰水期草地面积占比与高锰酸盐指数浓度呈正相关; 耕地面积占比在2个时期均与污染物浓度呈负相关。唐廉等(2018)探讨得出林地、草地可缓解水质恶化, 相当于“汇”, 而耕地、建设用地和水体则会导致水质恶化, 等同于“源”, 其中建设用地对水质恶化影响最大, 其

次为耕地。杨强强等(2020)以青弋江流域为研究对象, 探讨多时空尺度土地利用与水质的关系, 结果表明, 半径为500 m的圆形缓冲区在枯水期与丰水期对土地利用的水质解释率最高。

景观要素作为表征景观格局空间分布特征的指标, 其不同空间尺度下会对生态过程产生不同的影响(Lambin et al, 2003; 刘丽娟等, 2011), 最终使研究结果具有差异性。水环境可对景观格局的变化做出快速响应, 其空间分布特征随流域尺度内景观格局的变化而改变, 因此认为景观格局的变化是决定水环境质量的关键因素(Turner & Gardner, 2015)。国内外研究均表明, 景观格局对水环境的影响存在空间尺度效应且目前仍存在影响水环境最优空间尺度的分歧。Meneses等(2015)认为, 相较于流域尺度, 景观格局对水环境质量的依赖性在河岸带缓冲区尺度更小。Xu等(2019)在研究贵州乌江流域后发现影响河流水质的关键区域为河岸带缓冲区尺度内的景观格局。李艳利等(2012)研究浑太河流域后发现, 众多景观要素中CONTAG对水质影响最大且在缓冲区尺度上影响较于流域尺度显著。

干旱区水资源是制约人类社会生产生活发展的重要因素之一, 博斯腾湖作为干旱区最大的内陆淡水湖, 对维护生态安全与促进经济发展做出了巨大

收稿日期: 2022-11-02 修回日期: 2023-06-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41661007, 41261003); 新疆科技创新基地建设计划项目(2020D04039)。

作者简介: 胡丛巧, 1997年生, 女, 硕士研究生, 专业方向为自然资源开发与规划。E-mail: 2829547916@qq.com

通信作者: 迪丽努尔·阿吉, 1968年生, 女, 博士, 教授, 主要从事干旱区生态水文学研究。E-mail: 2548290281@qq.com

的贡献。自1960年来,由于人口激增,大规模的人类活动和自然环境的变迁,博斯腾湖水生态环境急剧恶化(施雅风等,2003;姜逢清和胡汝骥,2004)。已有研究(陈世峰,2021)对博斯腾湖水质进行评价,通过分析博斯腾湖流域土地利用/覆被变化探讨流域水质变化的驱动因子(阿依苏力坦·麦麦提艾力,2014),评价博斯腾湖流域生态环境(杜菲,2021),但这些研究均未涉及不同时空尺度下土地利用景观格局对水质的影响。本文通过博斯腾湖水质监测点的实测数据,结合景观格局指数研究方法对不同尺度半径范围内景观格局对水环境的影响进行定量分析,以期有效保护流域水质与生态管理提供科学的参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

博斯腾湖流域位于天山南麓焉耆盆地东南部(41°56′~42°14′ N, 86°26′~87°40′ E),涵盖博斯腾湖及上游开都河、木呼尔查干河、乌拉斯台河等流域(王媛等,2019)。博斯腾湖(以下简称博湖)位于焉耆盆地东南部博湖县境内,湖盆呈深碟状,中间低平,靠近湖岸区水深急剧变浅,水域辽阔,东西长达55 km,南北宽约20~50 km,博湖最深水位可达17 m,水域面积为1 002.4 km<sup>2</sup>,平均水深为8.8 m(周洪华等,2014;刘文等,2019)。博湖深居内陆,距海遥远,海洋水汽难以到达,故形成了典型的温带大陆性气候,年平均气温为8.9~12.7℃,年降水量为43.5~76.2 mm,降水主要集中在7—9月,年蒸发量为2 000.5~2 449.7 mm(刘祥和迪丽努尔·阿吉,2021;张敏和迪丽努尔·阿吉,2021)。开都河与黄水沟是博湖的主要补给河流,清水河次之,湖区西南部的孔雀河是唯一的出湖河流(郭燕妮等,2020)。

### 1.2 数据来源及处理

博湖流域土地利用数据来自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)2020年全国土地利用遥感监测数据。参照国家土地利用现状分类标准(GB/T21010—2017)(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化委员会,2017)并结合博湖流域土地利用实况及解译的可操作性,将土地利用类型划分为耕地、林地、草地、建设用地、水体、裸地等6种土地利用类型,其中林地和建设用地占比平均不足0.4%,因此后续分析中不予考虑。DEM数据来自地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>)。

相关研究显示,100 m~10 km不同缓冲区尺度内土地利用对湖泊与河流水质存在显著影响(项颂等,2018;方娜等,2019;乔悦,2020)。为探讨不同时空尺度下博湖流域土地利用景观格局对水环境的影响,以23个采样点(图1)为圆心分别提取半径为100、300、500、1 000、3 000 m的缓冲区,并与土地利用类型数据叠加获取不同空间尺度范围内的土地利用类型面积占比。

依据《水质 采样技术指导》(HJ494—2009)(中国环保部,2009)和水域生态系统长期监测规范(中国生态系统研究网络科学委员会,2007)并结合研究目的,2020年9月(平水期)、2021年6月(丰水期)和10月(枯水期)对23个采样点的表层(0.5 m)水体进行采样,每个采样点采集3个平行样本,取已用纯水处理的洁净聚乙烯塑料瓶采集水样,置于4℃冷藏,48 h内送往实验室进行检测,利用高锰酸钾滴定法测定高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>),纳氏试剂比色法测定氨氮(NH<sub>3</sub>-N),钼酸氨分光光度法测定总磷(TP),碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定总氮(TN)。

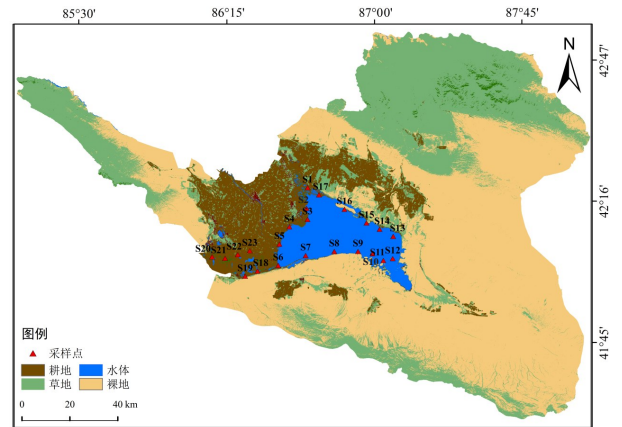


图1 研究区采样点与土地利用空间分布

Fig.1 Spatial distribution of sampling points and land use in the study area

景观格局通常指空间格局,在自然因素与人类活动共同作用下形成(徐延达等,2010)。景观格局指数不仅涵盖了大量的景观格局信息(刘怡娜等,2019),还在一定程度上体现了景观要素的空间异质性。选取可反映景观破碎度、聚集度、优势性及多样性等特性的景观格局指数,包括斑块个数(NP)、斑块密度(PD)、最大斑块指数(LPI)、景观形状(LSI)、蔓延度指数(CONTAG)、香农多样性指数(SHDI),用以表征博湖流域景观格局特性及其对水环境的影响,景观指数含义(黄金良等,2011;郭玉静,2018;Bian et al,2019)见表1。

表 1 选取的景观指数及景观含义

Tab.1 Selected landscape indices and their corresponding ecological significance

景观指数	景观含义
斑块个数(NP)	景观破碎度, NP 值与景观破碎度成正比, 体现景观要素的空间异质性
斑块密度(PD)	景观破碎度, PD 值越大, 景观越破碎
最大斑块指数(LPI)	LPI 值越大, 人类干扰程度越高
景观形状(LSI)	景观破碎化, LSI 值越大, 斑块不规则化程度越高, 景观形状越复杂
蔓延度指数(CONTAG)	景观聚集度, CONTAG 值越大, 景观聚集度越好
香农多样性指数(SHDI)	景观多样性, SHDI 值越大, 景观类型越丰富, 空间异质性增强

### 1.3 统计分析

在 Arcgis 10.8 平台上提取不同尺度缓冲区栅格地图, 景观格局指数在 Fragstats 4.2 软件中计算获得。借助 Canoco 5 软件对水质数据进行降趋势对应分析 (detrended correspondence analysis, DCA), 而后对不同时空尺度下土地利用与丰水期、平水期和枯水期的水质进行相关性分析, 结果显示, 丰水期、平水期与枯水期的 gradient length 的第一轴分别为 0.01、0.80 和 0.01, 均小于 3, 故应选择线性模型来拟合土地利用面积 (解释变量) 与水质数据 (响应变量) 之间的关系 (项颂等, 2018)。冗余分析 (RDA) 可较好地反映景观指数与水质之间的关系 (Xiao et al, 2016), 因此选择 RDA。基于 Origin 2018 软件, 因流域水质与土地利用综合指数、景观指数均不满足线性关系, 故采用双变量 Spearman 双尾相关性分析 (李艳利等, 2015), 探讨水质与其他指标之间的关系。

## 2 结果与分析

### 2.1 水质时空分布特征

博湖水水质特征在丰水期、平水期和枯水期分异明显 (图 2)。COD<sub>Mn</sub> 浓度为 0.5~8.4 mg/L, 21.7% 的采样点超过地表水 III 类水标准, 丰水期与平水期各采样点浓度差异大, 枯水期各采样点浓度波动较小。TN 浓度 0.17~4.47 mg/L, 55.1% 的采样点超过地表水 III 类水标准, 总体上呈现出丰水期与平水期高于枯水期, 另一个较为突出的特点是在采样点 S17~S23, 浓度在丰水期骤然下降, 峰值出现在平水期与枯水期, 通过对 100、300、500、1 000、3 000 m 等 5 种不同尺度缓冲区内土地利用类型进行定量分析发现, 其耕地占比分别为 87%、82%、73%、52%、53%, 人类因素可能是导致采样点 S17~S23 TN 浓度较高的主要原因。NH<sub>3</sub>-N 浓度为 0.01~1.52 mg/L, 除平水期部分采样点 (S7、S21) 超过地表水 III 类水标准, 其余水期各采样点浓度均满足地表水 III 类水标准。TP 浓度为 0.01~0.18 mg/L, 波动范围较大, 但各水期浓度未超出地表水 III 类水范围。参考地表水环境质量标准 GB3838—2002 (国家环境保护总局和国家质量监督检验检疫总局, 2002), 发现博湖水体主要受到氮、磷营养盐和有机污染物的影响, 其中, TN 和 COD<sub>Mn</sub> 是水体的主要污染物。

### 2.2 土地利用类型对水质影响的缓冲区半径

不同时空尺度下土地利用类型面积占比见图 3。总体而言, 随着缓冲区半径的扩大, 裸地与草地面积的比例增加; 水体面积比重较大且随缓冲区半径增

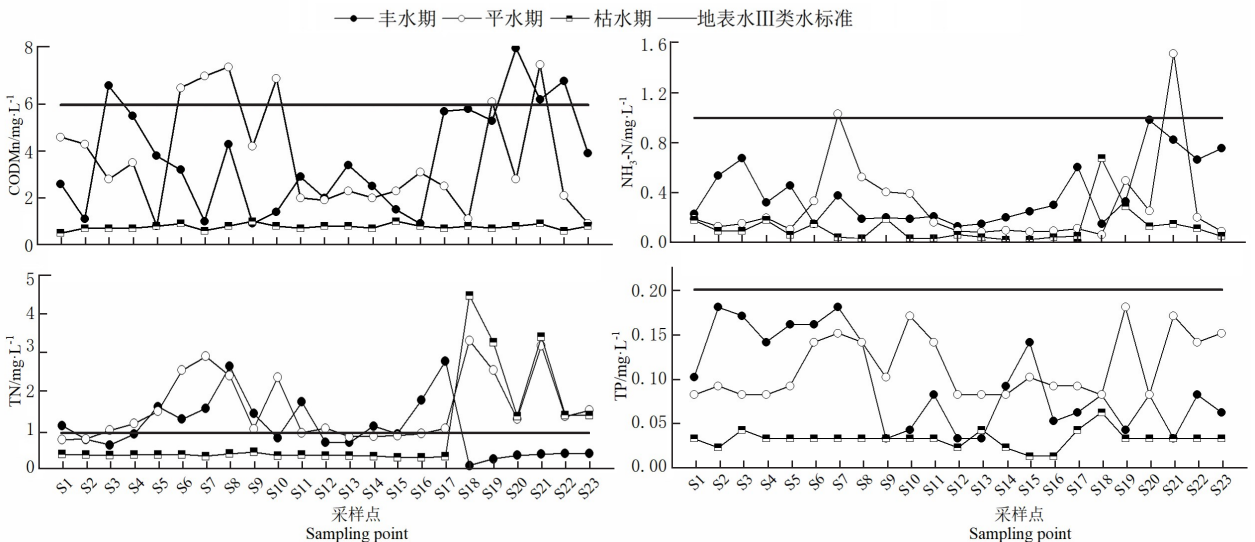


图 2 水质时空分布

Fig.2 Spatial and temporal distribution of water quality parameters

加变化较小;各尺度主要景观类型均由水体与耕地组成。在自然因素与人类活动的影响下,土地利用比例在不同采样点具有空间分异性。利用RDA分析,探讨影响博湖流域水质的最佳空间尺度(项颂等,

2018),发现丰、平、枯水期半径缓冲区分别为1 000、3 000、500 m内的土地利用方式对水质的解释率最高(表2),分别为40.0%、35.6%和31.1%,说明在该空间尺度内的土地利用类型对博湖水质的影响最为显著。

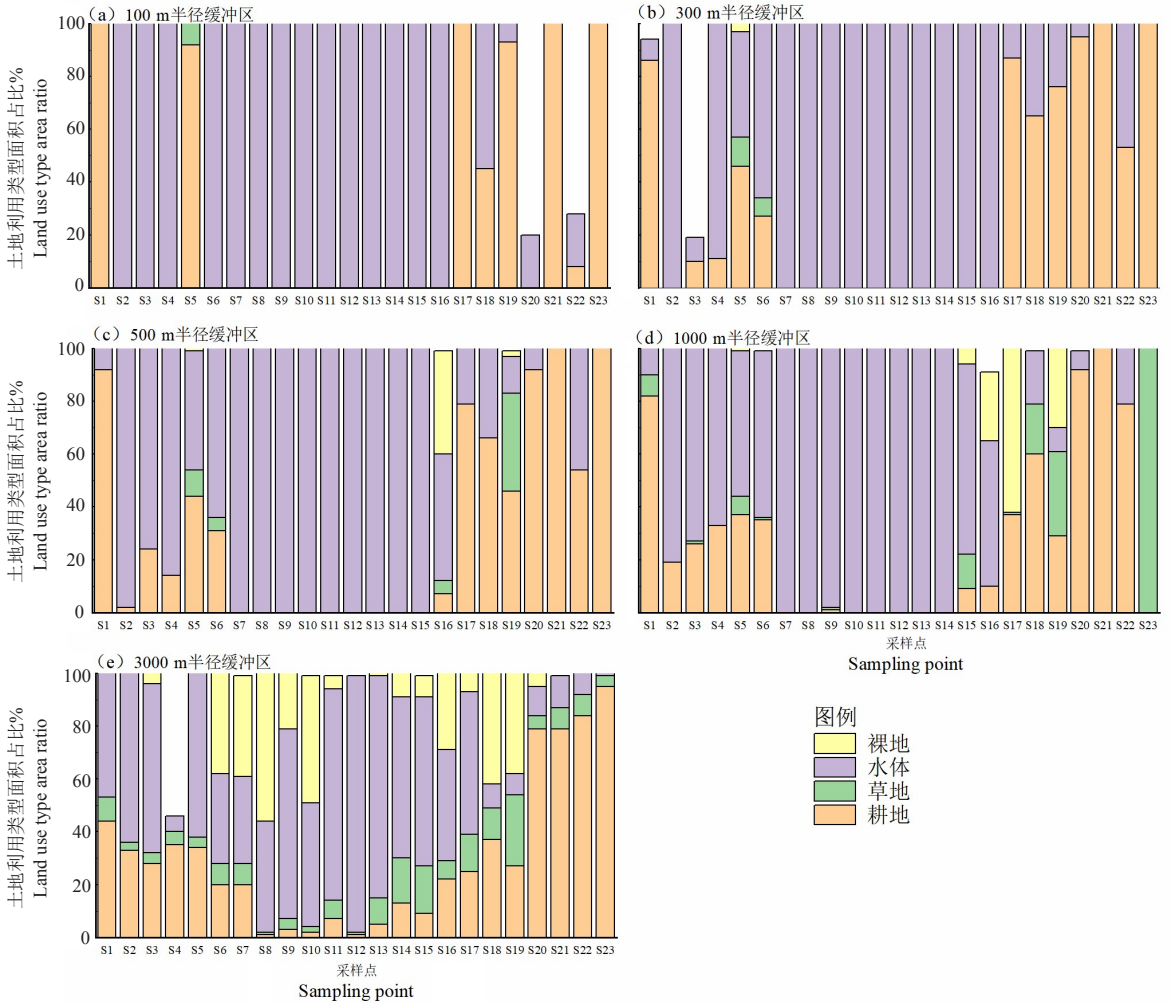


图3 不同空间尺度土地利用面积比例

Fig.3 Area proportion of different land use types at different spatial scales

### 2.3 不同空间尺度景观异质性

随着空间尺度的增加(图4),NP、LSI、CONTAG、SHDI 逐渐增大,PD、LPI 逐渐减小。NP 增大,景观斑块数量变多,土地利用破碎度增大,空间异质性增强;LSI 表示景观斑块形状的规则化程度,LSI 随空间尺度的增加呈上升趋势,说明景观形状复杂性随空间尺度增加而增强,形状多样性增大;CONTAG 代表景观团聚度,CONTAG 越大,表明景观是由多种要素组成且结构密集的格局,CONTAG 随空间尺度的增加呈上升趋势,说明景观团聚度不断增强;SHDI 属于敏感性指标,其值越高表示土地利用类型越丰富,景观类型趋向均衡

化,随着空间尺度的增加,SHDI 呈逐渐上升的趋势,表明尺度空间越大,其景观多样性越高,空间异质性越强。总体而言,研究区景观异质性随着缓冲区半径的增大而增强,土地破碎化程度亦随缓冲区半径增大而增大。

### 2.4 土地利用景观格局对水质的影响

2.4.1 土地利用类型对水质的影响 通过RDA分析,丰水期1 000 m半径缓冲区、平水期3 000 m半径缓冲区、枯水期500 m半径缓冲区土地利用方式对博湖水质的解释率最高,因此需深入探讨。

丰、平、枯水期第一轴特征值分别为0.265 0、0.235 2、0.234 1,各水期土地利用类型与水质数据的

表 2 冗余分析各排序轴方差解释率

Tab.2 Variance explanation rate for each sorting axis of the redundancy analysis

水期	缓冲区/m	参数	第一轴	第二轴	第三轴	第四轴	解释率/%
丰水期	100	特征值	0.216 7	0.030 6	0.003 2	0.539 5	
		累积解释的拟合变化	86.52	98.73	100	—	25.1
		典型相关	0.614 2	0.298 8	0.196	0	
	300	特征值	0.295 8	0.059 7	0.002 7	0.000 4	
		累积解释的拟合变化	0.614 2	0.298 8	0.196	0	35.9
		典型相关	0.797 2	0.367	0.223 2	0.103 8	
	500	特征值	0.267 5	0.043 6	0.012 1	—	
		累积解释的拟合变化	0.797 2	0.367	0.223 2	0.103 8	32.3
		典型相关	0.737 5	0.437 6	0.207 9	—	
	1 000	特征值	0.264 9	0.107 1	0.027 7	—	
		累积解释的拟合变化	66.27	93.06	100	—	40.0
		典型相关	0.753 3	0.655 5	0.312 8	—	
3 000	特征值	0.313 2	0.043 1	0.006 7	0.000 3		
	累积解释的拟合变化	86.21	98.08	99.93	100	36.3	
	典型相关	0.853	0.371 9	0.178 1	0.076 5		
平水期	100	特征值	0.148 6	0.022 4	0.000 8	0.542	
		累积解释的拟合变化	86.51	99.53	100	—	17.2
		典型相关	0.465 4	0.290 4	0.129 5	0	
	300	特征值	0.113 4	0.01 8	0.0091	0.000 3	
		累积解释的拟合变化	80.52	93.31	99.78	100	14.1
		典型相关	0.477 5	0.205 8	0.444 1	0.099 9	
	500	特征值	0.099 8	0.049 3	0.001 2	—	
		累积解释的拟合变化	66.43	99.23	100	—	15.0
		典型相关	0.452 6	0.459 4	0.064 3	—	
	1 000	特征值	0.126 3	0.074 3	0.000 1	0	
		累积解释的拟合变化	62.93	99.94	100	100	20.1
		典型相关	0.619 6	0.449 7	0.019 5	0.011 9	
3 000	特征值	0.235 2	0.116	0.004 5	0.000 1		
	累积解释的拟合变化	66.11	98.71	99.97	100	35.6	
	典型相关	0.885 5	0.517 2	0.136 5	0.068 3		
枯水期	100	特征值	0.236 4	0.006 4	0.000 6	0.537 7	
		累积解释的拟合变化	97.12	99.74	100	—	24.3
		典型相关	0.634 2	0.131 3	0.123 1	0	
	300	特征值	0.223 7	0.016 6	0.002 8	0.000 9	
		累积解释的拟合变化	91.73	98.51	99.65	100	24.4
		典型相关	0.699	0.196 4	0.298 4	0.101 9	
	500	特征值	0.234 1	0.076 9	0.000 4	—	
		累积解释的拟合变化	75.17	99.87	100	—	31.1
		典型相关	0.688 9	0.518 2	0.043 2	—	
	1 000	特征值	0.209 4	0.012 6	0.004 1	0	
		累积解释的拟合变化	92.58	98.16	99.98	100	22.6
		典型相关	0.670 5	0.212 4	0.127 5	0.195	
3 000	特征值	0.235 6	0.035 3	0.009 2	0.000 9		
	累积解释的拟合变化	83.83	96.41	99.68	100	28.1	
	典型相关	0.757 4	0.330 5	0.198 0	0.169 8		

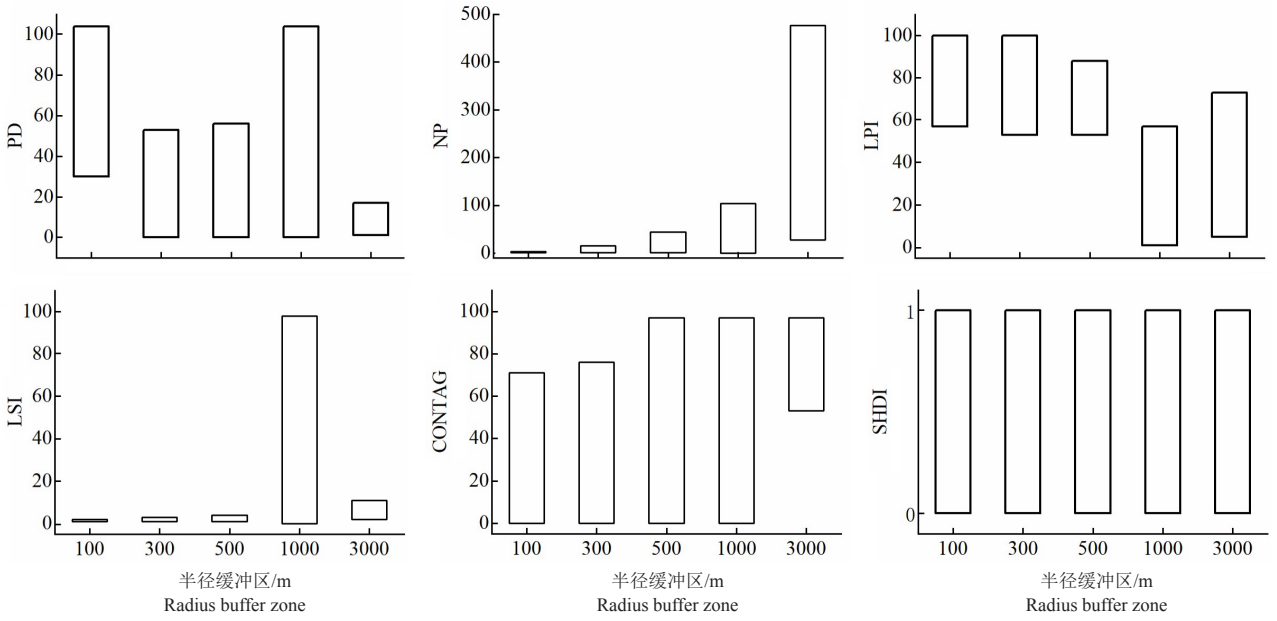


图 4 不同空间尺度景观指数值

Fig.4 Landscape index values at different spatial scales

相关系数分别为0.753 3、0.885 5和0.688 9,表明排序图能够较好地反映土地利用与水质指标的关系。图5显示了不同土地利用类型对水质各参数的影响,其中各土地利用方式箭头长度代表对水质指标的影响程度,其与水质指标之间形成的夹角表示相关性,角度越小,相关性越强,当夹角小于90°时,两者为正相关,接近或等于90°时,两者相关性较小或者不相关(周俊菊等,2019;冯娜娜等,2020)。丰水期1000 m半径缓冲区内,耕地面积比例与NH<sub>3</sub>-N、COD<sub>Mn</sub>呈正相关,与TN、TP呈负相关;草地面积比例与COD<sub>Mn</sub>、TP、NH<sub>3</sub>-N呈正相关,与TN呈负相关;水体面积比例与TN、TP呈正相关,与NH<sub>3</sub>-N、COD<sub>Mn</sub>呈负相关;裸地面积比例与COD<sub>Mn</sub>、TN、NH<sub>3</sub>-N呈正相关,与TP呈负相关。平水期3000 m半径缓冲区内,草地和裸地

面积比例与COD<sub>Mn</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TP、TN均为正相关;耕地面积比例与NH<sub>3</sub>-N、TN、TP呈正相关,与COD<sub>Mn</sub>呈负相关;水体面积比例与草地和裸地结果相反。枯水期500 m半径缓冲区,草地面积比例与NH<sub>3</sub>-N、TN呈正相关,与COD<sub>Mn</sub>、TP呈负相关;耕地面积比例与NH<sub>3</sub>-N、TP、TN呈正相关,与COD<sub>Mn</sub>呈负相关;水体和裸地面积比例与耕地结果相反。由上述分析可知,在4种土地利用类型中,无论是丰水期、平水期还是枯水期,耕地均与各水质指标之间存在一定程度的正相关性,表明耕地对水质的影响最大,是主要的污染输出源;水体在不同水期与大部分水质指标之间呈现负相关性;草地对水质的影响随时间与空间变化,在各水期与多数水质指标具有相关性;裸地在各水期均与COD<sub>Mn</sub>呈现正相关。

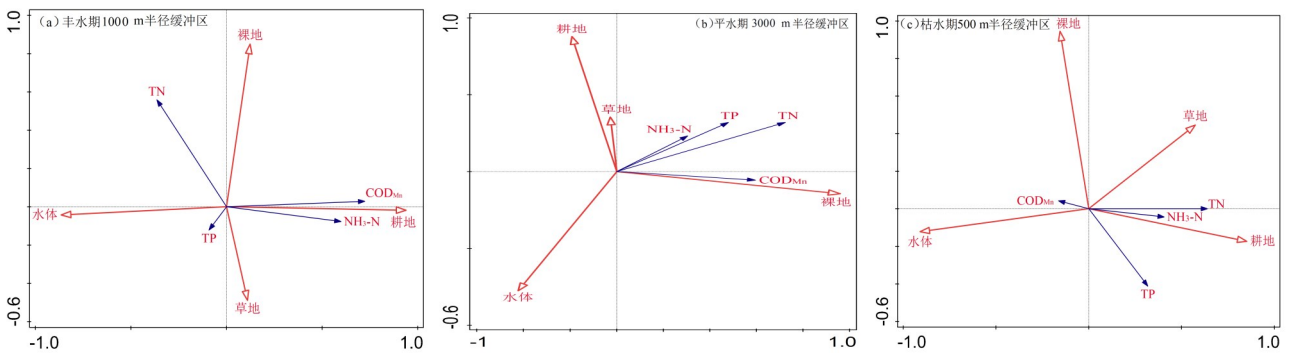


图 5 土地利用与流域水质关系的冗余分析

Fig.5 Redundancy analysis of the relationship between land use and water quality

2.4.2 景观格局指数与水质指标的相关性 Spearman 相关性分析(图 6)显示,不同尺度的缓冲区景观格局指数与水质指标之间具有一定的相关性。丰水期 1 000 m 半径缓冲区内 CONTAG 与 NH<sub>3</sub>-N 具有正相关性,而 NP、PD、LPI、LSI、SHDI 与其余水质之间未呈现出相关性。平水期 3 000 m 半径缓冲区内各景观格局指数与水质指标之间未呈现相关性。枯水期 500 m 半径缓冲区内 LSI 与 NH<sub>3</sub>-N、TN 具有正相关性;SHDI 与 NH<sub>3</sub>-N、TN 具有正相关性;LPI 与 NH<sub>3</sub>-N 表现为负相关,其与水质指标之间的关系较难被合理的解释,LPI 代表人为活动干扰程度,LPI 值越大,人类对水质的干扰程度越大,NH<sub>3</sub>-N 浓度就越大,故其不能用作预测水质的有效指标。部分景观格局指数与水质的关联存在着很大的不确定性,如 NP 与 PD 分别表示景观破碎度和景观异质性,其与水质之间未呈现相关性,故需进一步探讨。

### 3 讨论

#### 3.1 土地利用类型对水质的影响

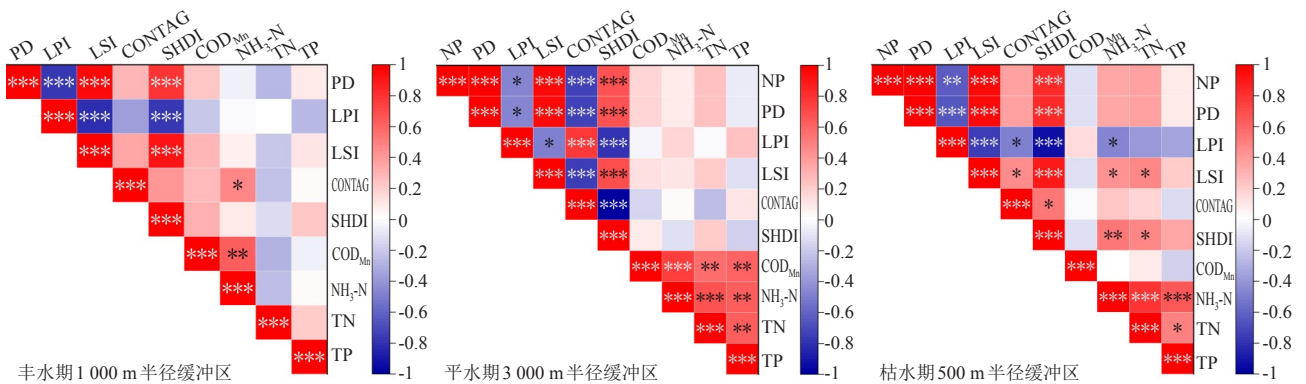
土地利用类型与水质显著相关,二者之间的关系越来越受到重视(Shen et al, 2015; Mello et al, 2018; Zhang et al, 2020),但二者关系的最佳空间尺度尚未形成统一结论(项颂等,2018)。流域的独特性、研究者使用数据集的分辨率及土地利用对空间的依赖性皆会导致研究结果各异(宋静雯等,2022)。通过 RDA 分析发现,土地利用对水质解释率最高的缓冲区半径分别为 1 000、3 000、500 m,而李好好等(2022)对河湟谷地研究发现该流域平水期对水质的解释率高于丰水期,平水期最优尺度为 200 m 缓冲区,丰水期最优尺度为 5 km 缓冲区,宋静雯等(2022)

探讨若尔盖湿地水质,发现对水质影响最大的半径缓冲区为 1 000 m。徐启渝等(2020a)对袁河研究表明土地利用对水质变化解释率最高是子流域尺度和远距离缓冲区(3 000 m);王一舒等(2021)发现土地利用在河岸缓冲区随尺度增大,对水质的解释度先增大后减小呈倒 U 型。由土地利用对水质影响具有尺度效应可知,规划合理的尺度对改善水质具有正效应,但尺度效应的复杂性使得单一尺度难以控制多数水质参数(徐启渝等,2020b)。

通过分析发现研究区内对水质解释率最佳的缓冲区尺度随水期不同而发生改变,与上述研究结果存在差异,导致差异的原因除研究区的独特性外还与其土地利用方式有关。由图 3 可知博湖不同缓冲区土地利用类型均以水体、耕地为主,草地、裸地比重较小,不同的土地利用方式使得各采样点水质状况不同,除此之外,缓冲区半径的选择也尤为重要,由于部分采样点位于水中,在 100~1 000 m 尺度内土地利用类型均为水体,使得土地利用类型与水质状况的关系比较模糊,故在后续研究中应设置合适的采样点,同时引入不同类型、范围更大的空间尺度,并增加水质监测的时间序列,将土地利用方式对博湖水质的影响做更深入的探讨。

#### 3.2 景观格局对水质的影响

景观格局通过在不同空间尺度上的景观比例、空间配置改变从而对水质产生影响(Amiri & Nakane, 2009),因此研究景观格局与水质之间的联系是改善水质的前提,但如何在大量景观指标中选出具有代表性的指标来建立景观格局与水质间的联系并分析其影响机理,是该类研究的重难点(赵鹏等, 2012)。彭勃等(2019)发现景观 PD(斑块密度)、



\*,  $P < 0.05$ ; \*\*,  $P < 0.01$ ; \*\*\*,  $P < 0.001$ 。

图 6 不同时空尺度下水质指标与景观指数相关性分析

Fig.6 Correlation analysis of water quality parameters and landscape indices at different temporal and spatial scales

SHDI(香农多样性指数)同河流水质表现出显著正相关,PD的多少与多样性的尺寸、斑块的复杂度成正比,耕地的PD越大,人类干扰度越强;SHDI的大小与景观异质性的强弱成正比,水体污染物浓度增加导致水质恶化与污染“源”在景观格局中的优势度及主导性增强有关。SHDI与NH<sub>3</sub>-N呈显著正相关性,表明枯水期500 m半径缓冲区范围内受“源”景观作用更强。王杰等(2018)研究丹江上游景观格局对水质的影响发现,LSI与DO(溶解氧)呈极显著负相关,而LSI表示人类因素对景观格局的影响,LSI与人类活动强度成正比,其值越大,丹江上游水质越差。

随着缓冲区半径的增大,研究区景观异质性及土地破碎化程度也相应增强。丰水期与平水期景观格局指数与各水质指标相关性远不及枯水期,枯水期500 m半径缓冲区范围内LSI与NH<sub>3</sub>-N、TN具有正相关性,LSI与水质指标有良好的相关性,因此可以利用LSI来预测区域水质变化,但景观格局指数众多,想要准确揭示景观格局与水质之间的关系,还需引入大量的景观格局指数进行分析。

#### 参考文献

阿依苏力坦·麦提艾力, 2014. 波斯腾湖流域土地利用/覆被变化及其驱动因子分析[D]. 乌鲁木齐:新疆师范大学.  
陈世峰, 2021. 波斯腾湖水质变化及其影响因素研究[D]. 乌鲁木齐:新疆师范大学.  
杜菲, 2021. 波斯腾湖流域生态环境评价及土地利用变化模拟[D]. 乌鲁木齐:新疆大学.  
方娜, 刘玲玲, 游清徽, 等, 2019. 不同尺度土地利用方式对鄱阳湖湿地水质的影响[J]. 环境科学, 40(12):5348-5357.  
FANG N, LIU L L, YOU Q H, et al, 2019. Effects of land use types at different spatial scales on water quality in Poyang lake wetland[J]. Environmental Science, 40(12): 5348-5357.  
冯娜娜, 董春来, 徐笠, 等, 2020. 辽河保护区土地利用方式对河流水质的影响[J]. 环境工程技术学报, 10(4):579-584.  
FENG N N, DONG C L, XU L, et al, 2020. Effect of land use pattern on water quality in Liaohe conservation area[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 10(4): 579-584.  
郭燕妮, 李元鹏, 邵克强, 等, 2020. 波斯腾湖有色可溶性有机物来源及季节变化特征[J]. 环境科学学报, 40(11):3971-3981.  
GUO Y N, LI Y P, SHAO K Q, et al, 2020. Sources and seasonal variation of chromophoric dissolved organic matter in lake Bosten[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 40(11): 3971-3981.

郭玉静, 王妍, 刘云根, 等, 2018. 普者黑岩溶湖泊湿地湖滨带景观格局演变对水质的影响[J]. 生态学报, 38(5):1711-1721.  
GUO Y J, WANG Y, LIU Y G, et al, 2018. The effects of landscape pattern evolution in Puzhehei Karst lake wetland littoral zone on water quality[J]. Acta Ecologica Sinica, 38(5):1711-1721.  
国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局, 2002. 地表水环境质量标准:GB3838—2002[S]. 北京:中国环境科学出版社.  
郝守宁, 董飞, 刘晓波, 等, 2020. 尼洋河流域土地利用结构对水质的关联分析[J]. 环境科学与技术, 43(1):194-200.  
HAO S N, DONG F, LIU X B, et al, 2020. Effects of land use structure on water quality in Niyang river[J]. Environmental Science & Technology, 43(1):194-200.  
黄金良, 李青生, 洪华生, 等, 2011. 九龙江流域土地利用/景观格局—水质的初步关联分析[J]. 环境科学, 32(1):64-72.  
HUANG J L, LI Q S, HONG H S, et al, 2011. Preliminary study on linking land use & landscape pattern and water quality in the Jiulong river watershed[J]. Environmental Science, 32(1):64-72.  
贾亚男, 袁道先, 2003. 土地利用变化对水城盆地岩溶水水质的影响[J]. 地理学报, (6):831-838.  
JIA Y N, YUAN D X, 2003. The impact of land use change on Karst water in Shuicheng basin of Guizhou Province[J]. Acta Geographica Sinica, (6):831-838.  
姜逢清, 胡汝骥, 2004. 近50年来新疆气候变化与洪、旱灾害扩大化[J]. 中国沙漠, (1):37-42.  
JIANG F Q, HU R J, 2004. Climate change and flood & drought disasters in Xinjiang during recent 50 years[J]. Journal of Desert Research, (1):37-42.  
李好好, 黄懿梅, 郭威, 等, 2022. 河湟谷地不同时空尺度下土地利用及空间格局对水质的影响[J]. 环境科学, 43(8): 4042-4053.  
LI H H, HUANG Y M, GUO W, et al, 2022. Influence of land use and land cover patterns on water quality at different spatio-temporal scales in Hehuang valley[J]. Environmental Science, 43(8):4042-4053.  
李艳利, 李艳粉, 徐宗学, 2015. 影响浑太河流域大型底栖动物群落结构的环境因子分析[J]. 环境科学, 36(1):94-106.  
LI Y L, LI Y F, XU Z X, 2015. Effect of environmental factors on macroinvertebrate community structure in the Huntai river basin[J]. Environmental Science, 36(1):94-106.  
李艳利, 徐宗学, 李艳粉, 2012. 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, 40(4):573-583.  
LI Y L, XU Z X, LI Y F, et al, 2012. A preliminary study on the

- relationship between multi-scale land use & landscape and river water quality response in the Huntai watershed [J]. *Earth and Environment*, 40(4):573-583.
- 刘丽娟, 李小玉, 何兴元, 2011. 流域尺度上的景观格局与河流水质关系研究进展[J]. *生态学报*, 31(19):5460-5465.
- LIU L J, LI X Y, HE X Y, 2011. Advances in the studying of the relationship between landscape pattern and river water quality at the watershed scale[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 31(19):5460-5465.
- 刘文, 吉力力·阿不都外力, 马龙, 2019. 博斯腾湖表层沉积物元素地球化学特征及重金属污染评价[J]. *地球环境学报*, 10(2):128-140.
- LIU W, JILILI A, MA L, 2019. Geochemical characteristics of major and trace elements and heavy metal pollution status in surface sediment of Bosten lake[J]. *Journal of Earth Environment*, 10(2):128-140.
- 刘祥, 迪丽努尔·阿吉, 2021. 博斯腾湖西岸表面流人工湿地对水体中重金属离子的去除效果[J]. *湿地科学*, 19(1):126-131.
- LIU X, DILINUER·Aji, 2021. Removal effect of heavy metal ions in the water by surface flow constructed wetland in west coast of Bosten lake[J]. *Wetland Science*, 19(1):126-131.
- 刘怡娜, 孔令桥, 肖毅, 等, 2019. 长江流域景观格局与生态系统水质净化服务的关系[J]. *生态学报*, 39(3):844-852.
- LIU Y N, KONG L Q, XIAO Y, et al, 2019. Relationships between landscape pattern and ecosystem water purification service in the Yangtze River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 39(3):844-852.
- 彭勃, 付永胜, 赵君凤, 等, 2019. 小流域土地利用景观格局对水质的影响[J]. *生态科学*, 38(3):90-99.
- PENG B, FU Y S, ZHAO J F, et al, 2019. Effect of land use landscape pattern on water quality in small watershed[J]. *Ecological Science*, 38(3):90-99.
- 乔悦, 国巧真, 吴欢欢, 等, 2020. 地表水水质时空变化及其与土地利用响应研究[J]. *环境监测管理与技术*, 32(6):23-27,71.
- QIAO Y, GUO Q Z, WU H H, et al, 2020. Study on temporal and spatial variation of surface water quality and its response to land use[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 32(6):23-27,71.
- 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等, 2003. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. *第四纪研究*, (2):152-164.
- SHI Y F, SHEN Y P, LI D L, et al, 2003. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm wet in northwest China[J]. *Quaternary Sciences*, (2):152-164.
- 宋静雯, 张学霞, 姜东昉, 等, 2022. 不同尺度土地利用方式对地表水环境质量的影响及驱动机制[J]. *环境科学*, 43(6):3016-3026.
- SONG J W, ZHANG X X, JIANG D Y, et al, 2022. Impact of land use types at different scales on surface water environment quality and its driving mechanism[J]. *Environmental Science*, 43(6):3016-3026.
- 唐廉, 胡晓辉, 权冠中, 等, 2018. 潭江流域水质时空分布特征及其与土地利用的相关性分析[J]. *地球与环境*, 46(4):364-372.
- TANG L, HU X H, QUAN G Z, et al, 2018. Spatiotemporal distribution of water quality in the Tanjiang river and its correlation with the land use[J]. *Earth and Environment*, 46(4):364-372.
- 王杰, 李鹏, 高海东, 等, 2018. 丹江上游土地利用/景观指数与水质关系初探[J]. *水土保持研究*, 25(6):383-389.
- WANG J, LI P, GAO H D, et al, 2018. Preliminary study on the relationship between land use/landscape index and water quality in the upper reaches of Danjiang river[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 25(6):383-389.
- 王一舒, 吴仁人, 荣楠, 等, 2021. 西江下游流域水质与不同空间尺度土地利用的响应关系[J]. *水资源保护*, 37(4):97-104.
- WANG Y S, WU R R, RONG N, et al, 2021. Response relationship between water quality in the lower reaches of Xijiang river basin and land use at different spatial scales[J]. *Water Resources Protection*, 37(4):97-104.
- 王媛, 焦黎, 董煜, 2019. 博斯腾湖流域干旱变化趋势及气候影响因素[J]. *干旱区研究*, 36(5):1102-1108.
- WANG Y, JIAO L, DONG Y, et al, 2019. Drought change trend and its affecting climatic factors in the Bosten lake basin [J]. *Arid Zone Research*, 36(5):1102-1108.
- 项颂, 庞燕, 窦嘉顺, 等, 2018. 不同时空尺度下土地利用对洱海入湖河流水质的影响[J]. *生态学报*, 38(3):876-885.
- XIANG S, PANG Y, DOU J S, et al, 2018. Impact of land use on the water quality of inflow river to Erhai lake at different temporal and spatial scales[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 38(3):876-885.
- 徐启渝, 王鹏, 舒旺, 等, 2020a. 土地利用结构与空间格局对袁河水质的影响[J]. *环境科学学报*, 40(7):2611-2620.
- XU Q Y, WANG P, SHU W, et al, 2020a. Investigation of the impacts of land use structure and spatial pattern on water quality in the Yuan river[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 40(7):2611-2620.
- 徐启渝, 王鹏, 王涛, 等, 2020b. 土地利用结构与景观格局对鄱阳湖流域赣江水质的影响[J]. *湖泊科学*, 32(4):1008-1019.
- XU Q Y, WANG P, WANG T, et al, 2020b. Investigation of the impacts of land use structure and landscape pattern on water quality in the Ganjiang river, lake Poyang basin[J].

- Journal of Lake Sciences, 32(4):1008-1019.
- 徐延达, 傅伯杰, 吕一河, 2010. 基于模型的景观格局与生态过程研究[J]. 生态学报, 30(1):212-220.
- XU Y D, FU B J, LYU Y H, et al, 2010. Research on landscape pattern and ecological processes based on landscape models[J]. Acta Ecologica Sinica, 30(1):212-220.
- 杨强强, 徐光来, 杨先成, 等, 2020. 青弋江流域土地利用/景观格局对水质的影响[J]. 生态学报, 40(24):9048-9058.
- YANG Q Q, XU G L, YANG X C, et al, 2020. Responses of water quality to land use & landscape pattern in the Qingyijiang river watershed[J]. Acta Ecologica Sinica, 40(24):9048-9058.
- 张敏, 迪丽努尔·阿吉, 2021. 博斯腾湖西岸人工湿地生态系统服务价值评估研究[J]. 海洋湖沼通报, 43(5):169-174.
- ZHANG M, DILINUER·Aji, 2021. Evaluation of ecosystem service value of constructed wetland on the west bank of the Bosten lake[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 43(5):169-174.
- 赵鹏, 夏北成, 秦建桥, 等, 2012. 流域景观格局与河流水质的多变量相关分析[J]. 生态学报, 32(8):2331-2341.
- ZHAO P, XIA B C, QIN J Q, et al, 2012. Multivariate correlation analysis between landscape pattern and water quality [J]. Acta Ecologica Sinica, 32(8):2331-2341.
- 赵玉, 2020. 渭河干流浅层地下水与地表水中重金属Cd污染特征及风险评价[J]. 地球科学与环境学报, 42(2):267-277.
- ZHAO Y, 2020. Characteristics and risk assessment of heavy metal Cd pollution of shallow groundwater and surface water in main stream of Weihe river, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 42(2):267-277.
- 中国环保部, 2009. 水质 采样技术指导:HJ494—2009[S]. 北京:中国环境科学出版社.
- 中国生态系统研究网络科学委员会, 2007. 水域生态系统观测规范[M]. 北京:中国环境科学出版社.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2017. 土地利用现状分类:GB/T21010—2017[S]. 北京:中国标准化出版社.
- 周洪华, 李卫红, 陈亚宁, 等, 2014. 博斯腾湖水盐动态变化(1951—2011年)及对气候变化的响应[J]. 湖泊科学, 26(1):55-65.
- ZHOU H H, LI W H, CHEN Y N, et al, 2014. Water-salt succession patterns (1951-2011) and its response to climate change in lake Bosten[J]. Journal of Lake Sciences, 26(1):55-65.
- 周俊菊, 向鹏, 王兰英, 等, 2019. 祁连山东部冰沟河流域景观格局与河流水化学特征关系[J]. 生态学杂志, 38(12):3779-3788.
- ZHOU J J, XIANG J, WANG L Y, et al, 2019. Relationship between landscape pattern and hydrochemical characteristics of Binggou river basin in eastern Qilian mountains[J]. Chinese Journal of Ecology, 38(12):3779-3788.
- AMIRI B J, NAKANE K, 2009. Modeling the linkage between river water quality and landscape metrics in the Chugoku district of Japan[J]. Water Resources Management, 23(5):931-956.
- BIAN Z, LIU L, DING S, 2019. Correlation between spatial-temporal variation in landscape patterns and surface water quality: a case study in the Yi River Watershed, China[J]. Applied Sciences, 9(6):1053.
- LAMBIN E F, TURNER B L, GEIST H J, et al, 2003. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths[J]. Global Environmental Change, 11(4):261-269.
- MELLO K, VALENTE R A, RANDHIR T O, et al, 2018. Effects of land use and land cover on water quality of low-order streams in Southeastern Brazil: watershed versus riparian zone[J]. Catena, 167:130-138.
- MENESES B M, REIS R, VALE M, et al, 2015. Land use and land cover changes in Zêzere watershed (Portugal) - Water quality implications[J]. Science of the Total Environment, 527/528:439-447.
- SHEN Z, HOU X, LI W, et al, 2015. Impact of landscape pattern at multiple spatial scales on water quality: a case study in a typical urbanised watershed in China[J]. Ecological Indicators, 48:417-427.
- TURNER M G, GARDNER R H, 2015. Landscape ecology in theory and practice: pattern and process[M]. 2nd. New York: Springer.
- XIAO C, YE J, ESTEVES R M, et al, 2016. Using Spearman's correlation coefficients for exploratory data analysis on big dataset[J]. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 28(14):3866-3878.
- XU G, REN X, YANG Z, et al, 2019. Influence of landscape structures on water quality at multiple temporal and spatial scales: a case study of Wujiang River Watershed in Guizhou[J]. Water, 11(1):159.
- ZHANG J, LI S, JIANG C, 2020. Effects of land use on water quality in a River Basin (Daning) of the Three Gorges Reservoir Area, China: watershed versus riparian zone[J]. Ecological Indicators, 113:106226.

## Effect of Land Use Pattern on Water Quality in Bosten Lake at Different Temporal and Spatial Scales

HU Congqiao<sup>1</sup>, Dilinuer·Aji<sup>1,2</sup>, LI Ruxia<sup>1</sup>, WANG Xiaolan<sup>1</sup>, Yusufujiang·Rusuli<sup>2</sup>

(1. School of Geography and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, P.R. China;

2. Key Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid area of Xinjiang, Urumqi 830054, P.R. China)

**Abstract:** Limited water resources in arid regions is an important factor constraining development of social production and human life activities. Bosten Lake, the largest inland freshwater lake in the arid region, has contributed greatly to maintaining ecological security and promoting economic development. In this study, the impact of land use patterns on the water quality of Bosten Lake was revealed at different space-time scales by combining redundancy analysis (RDA) with Spearman correlation. Our aim was to provide a reference and data to support effective protection of water quality and ecological management of the Bosten Lake basin. The study was based on Google Earth remote sensing data (2020) and water quality data measured in the normal season (September, 2020), wet season (June, 2021) and dry season (October, 2021) at 23 sampling points of Bosten Lake. Areas within radii of 100, 300, 500, 1 000, 3 000 m to the sampling points were set as the buffer zones, which were then overlaid with land use data to obtain the area proportions of different land use types within the different spatial scales. Six land use types were delineated, including cultivated, woodland, grass land, water area, construction land, and bare land. However, woodland and construction land were not included in the analysis because their areas were less than 0.4% of the total area. Results show that: (1) The concentrations of  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  and TN in Bosten Lake were abnormally high, exceeding Class III standards for surface water at 21.7% and 55.1% of the sampling points, respectively, indicating that TN and  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  were the primary pollutants. (2) There was a significant correlation between land use and water quality within five of the buffer zones. The buffer zones with radii of 1 000, 3 000 and 500 m in the wet, normal and dry seasons best explained water quality with explanatory rates of 40.0%, 35.6% and 31.1%, respectively. (3) Landscape heterogeneity and fragmentation increased with spatial scale. (4) Among the four land use types, cultivated land was the primary source of water quality deterioration, followed by grassland. Although grasslands can play a positive role in purifying water, inappropriate management has allowed pollutants to enter the water. (5) In terms of the landscape pattern indices, landscape shape index (LSI) correlated positively with  $\text{NH}_3\text{-N}$  and TN, and there was a significant positive correlation between the Shannon-Wiener diversity index (SHDI) and  $\text{NH}_3\text{-N}$ . This indicates that increased landscape fragmentation leads to deterioration of water quality, but there is a large uncertainty in the correlation between LSI and water quality that will require further investigation. Analyzing how land use affects water quality in Bosten Lake supports the formulation of rational water quality protection measures and enhances sustainable resource utilization.

**Key words:** temporal and spatial scales; land use; landscape pattern; water quality; Bosten Lake