

太湖上游水源区河流水质对景观格局变化的响应关系——以东苕溪上游为例*

范雅双, 于婉晴, 张 婧, 李 雪, 李小玉**

(浙江农林大学林业与生物技术学院, 杭州 311300)

摘 要: 景观格局演变作为人类活动的综合表征, 通过改变水文过程和径流路径, 从而影响非点源污染物的发生位置、迁移路径和转化过程, 进而对流域水环境产生深刻影响。苕溪作为太湖的主要入湖河流之一, 对太湖水环境有着关键的影响作用。本文以发源于杭州市临安区太湖源镇的东苕溪上游区域作为研究对象, 在对河流水质进行两个时期监测的基础上, 运用相关性分析、冗余分析和逐步回归分析等方法, 综合景观组分指数和景观空间配置指数, 在子流域尺度上量化景观指数对河流不同水质指标的解释能力, 探讨河流水质对流域景观格局的响应规律。结果表明: 1) 东苕溪上游大部分监测点总氮浓度远超地表水 V 类水质标准限值, 但氨氮和总磷浓度整体较低, 部分监测点可达 I 类水质标准。2) 在汛期, 景观组成中流域的“源”景观比例是影响水质的重要因素, 农业用地占比与硝态氮、总氮浓度呈显著正相关, 建设用地占比对氨氮、总磷浓度影响显著; 而在非汛期, 景观配置因子, 特别是表征斑块形状的周长-面积分形维数(PA-FRAC)对河流水质的影响极显著。3) 无论是汛期还是非汛期, 林地和草地对河流中污染物均具有显著的削减作用, 是流域河流污染防治的关键“汇”景观。4) 从整体上来看, 河流氮、磷污染与人类活动强度密切相关, 增加景观连通性、降低自然景观的破碎化程度可有效改善河流水环境。

关键词: 景观格局; 水质; 子流域; 东苕溪上游

Response of water quality to landscape pattern change in the water source area of upper reaches of Lake Taihu: A case study in the upper reaches of Dongtiaoxi River*

Fan Yashuang, Yu Wanqing, Zhang Jing, Li Xue & Li Xiaoyu**

(School of Forestry and Bio-technology, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, P.R.China)

Abstract: As a comprehensive representation of human activities, landscape pattern evolution affects the location, migration path and transformation process of non-point source pollutants by changing the hydrological process and flow path, and thus has a profound impact on the water environment of the basin. As one of the main rivers entering Lake Taihu, Tiaoxi River plays a critical role in the water environment of Lake Taihu. In this paper, the upper reaches of Dongtiaoxi River originating in Taihuyuan Town, Lin'an District, Hangzhou City is taken as the research area. Based on the monitoring of river water quality in two periods, by integrating landscape component indexes and landscape spatial configuration indexes, methods like correlation analysis, redundancy analysis and stepwise regression analysis are used to quantify the interpretation ability of landscape indexes to different water quality indexes and discuss the response pattern of river water quality to the watershed landscape pattern on the sub-watershed scale. The results show that: 1) The total nitrogen (TN) concentration far exceeds the surface water quality class V standard limit at most sampling sites in the upper reaches of Dongtiaoxi River, but the concentrations of ammonia nitrogen ($\text{NH}_3\text{-N}$) and total phosphorus (TP) are generally low, and some sampling sites could reach class I water quality standard. 2) During the flood season, in landscape composition, the proportion of "Source" landscape in the basin is an important contributor to water quality. Farmland has a significant positive correlation with nitrate-nitrogen ($\text{NO}_3\text{-N}$) and TN concentration, while construction land impacts $\text{NH}_3\text{-N}$ and TP con-

* 2020-12-04 收稿; 2021-01-12 收修改稿。

国家自然科学基金项目(31870702, 32071581)和省部共建亚热带森林培育国家重点实验室自主研究课题项目(ZY20190203)联合资助。

** 通信作者; E-mail: lixy76@163.com.

centrations; in non-flood season, the water quality is dramatically impacted by landscape configuration factors, especially the perimeter-area fractal dimension characterizing the patch shape. 3) Whether in flood season or non-flood season, forest and grassland can remarkably reduce pollutants in rivers, acting as the key "Sink" landscape for the prevention and control of river pollution in the basin. 4) On the whole, nitrogen and phosphorus pollution in the river is closely related to the intensity of human activities. The water environment of the river can be effectively improved by increasing landscape connectivity and lowering the fragmentation of the natural landscape.

Keywords: Landscape pattern; water quality; sub-watersheds; the upper reaches of Dongtiaoxi River

随着社会经济的高速发展,水污染问题日益严重,已逐渐发展为制约人类社会继续进步的因素之一^[1]. 研究发现,流域内景观格局的变化不仅改变地表径流及其生态过程,影响了其生态功能,对水环境也产生了深刻影响^[2-3]. 从非点源污染物的传输过程来看,从其产出地到进入水体的整个过程中,地表径流需通过不同的景观类型,一部分景观会对非点源污染的传输起到抑制作用,这类景观通常被称为“汇”,而与之对应的、对这一过程起到促进作用的则被称为“源”^[4],而“源”“汇”景观的配置会直接影响到面源污染物最终对河流的贡献程度^[5-6],其中农业和城市用地作为“源”,其面积的扩张被视为营养物质增加的最大贡献者之一^[7]. 因此,探究景观格局对非点源污染的作用、通过合理配置土地利用格局以达到改善水质的目的成为水环境污染控制的一大方向^[8-9].

现阶段关于景观格局对河流水质影响的相关研究中,常用的分析方法有相关性分析、冗余分析、主成分分析等^[2,9]. 现有研究表明,建设用地对河流水质指标具有较强的解释能力^[10],其对河流中的氮、磷浓度有显著影响^[11]. 同时,建设用地的集聚分布是河流污染的主要驱动因素^[12],对比不同城市化梯度下的区域河流水质分布空间格局,发现流域内以农业和建设用地为主的区域水质往往比其他地区差^[11,13]. 而通过减少自然景观组成碎片化,增加区域河流的连通性,减少人为对流域景观结构的干扰,可以减轻水质污染^[14]. 研究表明区域地表水质量与景观组成和景观破碎化程度密切相关,但相较于景观破碎化程度,景观组成似乎是导致水质变化的主要因素^[15]. 也有研究者认为提高自然植被生产力比合理配置景观更能切实可靠地改善水质^[16]. 林地作为一种“汇”景观,对河流中污染物的削减和净化作用已得到了广泛证实,在大尺度上增加林地面积有利于改善水质状况^[17]. 总之,有关景观组成对河流水质的影响研究已较为成熟,结论也较为一致;但关于景观空间配置对河流水质的影响,在不同的研究区和不同的研究尺度上表现为不同的作用强度和大小. 因此,本研究综合景观组分指数和景观空间配置指数,在子流域尺度上探讨景观指数对河流不同水质指标的解释能力,为流域非点源污染治理提供理论依据.

太湖是典型的大型浅水湖泊,河流与湖泊相互交错,以太湖为中心形成了我国著名的水网地区和全国河道密度最大的地区,作为长江三角洲核心区域,太湖流域以 0.4% 的国土面积,贡献了全国 9.8% 的 GDP. 太湖作为我国经济最发达、人口最密集地区之一,流域水环境与人类生活息息相关,水体污染问题受到了广泛关注^[18-19]. 苕溪作为太湖上游最大的入湖水系,河流水质对太湖水环境有着至关重要的影响. 然而,随着苕溪流域内社会经济的快速发展,土地利用强度不断提升,农业化肥和农药施用量的增加使得进入水体的污染物也相应增加,使整个流域原本就存在的农业面源污染问题更加突出,污染物的排放总量远远超过水体纳污能力,加剧了流域水体污染,加重了太湖水体的富营养化^[20]. 据统计,湖西区入湖污染负荷可达环湖入湖污染负荷总量的 70% 以上,剩下约有 30% 的污染负荷来源于浙西区^[21],而属浙西区的杭州市临安区及余杭区作为东苕溪的发源地,对其水质进行监测可以在防治太湖水污染的同时研究山地丘陵地带景观格局变化对河流水质的影响. 因此,本研究选择东苕溪上游作为研究区,基于景观生态学的原理和方法,分析东苕溪上游景观格局的空间差异特征,在对河流水环境进行定点监测的基础上,利用多种分析方法探讨流域景观格局对河流水质的影响规律,为该区域水环境的污染防治提供科学依据.

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

东苕溪发源于临安区太湖源镇白沙村,地势西南高东北低,流经临安区的里畈、桥东、临天、青山,流至余杭区的余杭街道后折北流,3 条主要支流于瓶窑镇汇合. 东苕溪上游属亚热带季风气候,四季分明,年均气

温为 $15.5 \sim 15.8^{\circ}\text{C}$, 年平均降水量为 1460 mm, 汛期降水量约占 75% 左右. 汛期分为梅汛期和台汛期, 梅汛期为 6 月, 台汛期为 8 月或 9 月. 土壤主要为红壤和黄壤, 土壤渗透性较强, 植被现状以次生针叶林和竹林为主体, 主要农作物为水稻、茶叶、蔬菜等^[22-24]. 作为太湖的主要入湖河流之一^[25], 东苕溪 85% 的水量最终汇入太湖; 东苕溪也是杭州市的两大水源地之一, 供水量占总水量的 20%^[26], 其水环境安全与社会经济的发展密切相关. 本研究选择东苕溪瓶窑段以上(水源区)作为研究对象(图 1), 探究以农业、轻工业为主且正处于城镇化加速推进阶段的东苕溪上游河流水质的时空变化特征, 建立景观格局和河流水质的量化关系.

1.2 景观类型解译

以高分二号(GF-2)融合后遥感影像(2017 年)为基础数据源, 融合后的多光谱分辨率为 4 m, 根据 2019 年 TM 影像和谷歌卫星影像, 结合 2019 年实地调查结果, 通过 eCognition 面向对象遥感解译方法进行数字化, 得到研究区 2019 年景观类型. 通过现场验证, 解译精度达 92%, 满足数据分析要求. 参照《土地利用现状分类》(GB/T 21010—2017)的一级类型划分标准, 结合东苕溪上游区域实际情况, 对占比较低的类型进行了合并处理, 最终将研究区景观类型划分为建设用地、农业用地、林地、草地、交通用地和水域 6 种类型. 其中, 用于竹笋生产的竹林作为研究区内的一种特殊经济作物, 其经营管理过程中的施肥强度极高, 每年施肥 4 次, 每次施用的氮、磷复合肥约为 $450 \sim 750 \text{ kg/hm}^2$, 年均施肥量高达 $1800 \sim 3000 \text{ kg/hm}^2$, 远高于其他作物, 在经营管理下的竹林易造成养分的流失, 氮、磷伴随着降水通过地表径流进入河流水体中, 对河流环境产生较大影响^[27], 因此本研究在分类时将在耕地内种植的、人工经营下的竹林归入农业用地.

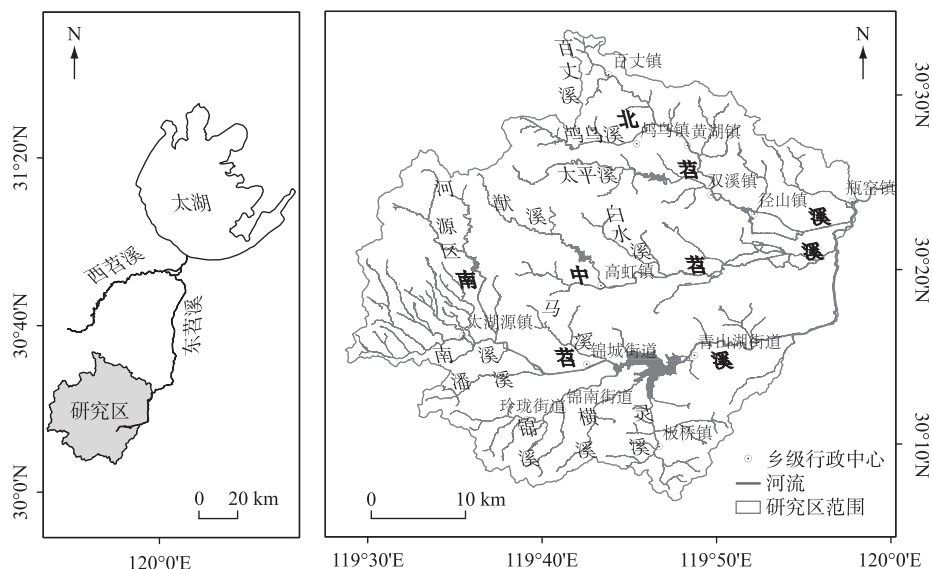


图 1 研究区地理位置

Fig.1 Geographical location of the study area

1.3 子流域划分

有研究表明, 子流域是分析景观类型占比及景观格局指数对河流水质影响的适合尺度^[28-29]. 基于 DEM 数据, 利用 ArcGIS 的水文分析功能, 同时结合研究区河流水系图, 进行子流域划分. 由于研究区地形西高东低, 东部主要为低洼平原地区, 水流方向较难确定, DEM 提取的边界误差相对较大, 因此选择上游山区出口处无明显点源污染影响, 且河流流向明确、边界清晰的 57 个子流域作为研究对象(图 2a).

1.4 景观格局指数的选择与计算

在本研究中, 通过统计各景观类型占比反映景观组成信息, 利用 Fragstats 4.2 计算子流域内景观水平上的格局指数, 得到景观空间配置情况. 景观格局指数与河流水质指标之间的关系复杂多变, 因地制宜, 因时而异^[30-32]. 本研究按照景观指数所量化景观格局特征的类型, 每个类型选择 1~2 个指数, 根据已有研究成果

选取对流域水环境解释能力相对稳定、且在研究区特征较为明显的 10 个景观格局指数用于进一步研究,具体为:斑块密度(*PD*)、最大斑块指数(*LPI*)、边缘密度(*ED*)、景观形状指数(*LSI*)、周长—面积分形维数(*PAFRAC*)、景观蔓延度指数(*CONTAG*)、散布与并列指数(*IJI*)、景观分割度(*DIVISION*)、香农多样性指数(*SHDI*)和聚集度指数(*AI*)。

1.5 水质监测

在每个子流域的出口附近设置水质监测点,共 57 个。野外实地采样 2 次,于 2019 年 6 月和 2019 年 12 月进行,分别为研究区汛期和非汛期的典型时段。采样时间选择当月中旬连续晴天且采样前 3 天无降水的时段,避免降水事件影响测定结果的代表性。河流样品采集时选择河道中央且水流速度较快的位置,以保证水质样品的代表性。使用 Skalar 的 BluVision™ 间断化学分析仪对河流水质进行检测,水质样品的采集、运输和保存方法参照《地表水和污水监测技术规范》(HJ/T 91—2002),检测指标为氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、总氮(TN)和总磷(TP),分析测试方法参照《水和废水监测分析方法(第四版)》。由于 BluVision™ 间断化学分析仪对总磷的最低可检测浓度为 0.005 mg/L,而总磷在东苕溪上游区域浓度较低,部分监测点总磷浓度低于 0.005 mg/L,未能检出。

1.6 数据分析

在对水质监测数据进行正态分布检验的基础上,利用 Pearson 相关分析、冗余分析(RDA)和逐步回归分析探讨河流水质对景观格局的响应规律。在 Origin 2018 软件中进行河流水质与景观格局的 Pearson 相关分析,评价景观格局指标和河流水质指标两两之间的定量关系。为进一步探究各影响因子对河流水质的贡献程度,通过 Canoco 5 软件进行冗余分析,得到 RDA 排序图和各影响因子对河流水质的贡献度;在确定选择冗余分析前,已通过 DCA 分析核实其第一轴长度远小于 3^[33],适用 RDA 分析。而逐步回归分析作为一种“多对一”的分析方法,能很好地确定解释每一个水质指标最佳的景观指标^[34],其计算和分析在 SPSS 19.0 软件中进行。

2 结果和分析

2.1 东苕溪上游景观格局分析

研究区总面积为 1890 km²(图 2b),林地是东苕溪上游最主要的景观类型,占研究区总面积的 68.2%,主要分布于研究区的西部,靠近东天目山山脉。这是由于东苕溪源头区域城镇化水平较低,对自然景观的人为影响较小,目前仍保留有大片森林景观。农业用地占研究区面积的 15%,大部分水田、旱地都分布于研究区东部的平原地区。竹林作为研究区内的特色农业产品,分布和管理情况较为特殊:人为经营下的竹林主要分布于南溪(太湖源镇)附近,且往往规整地种植于耕地之中,也有部分沿山脚逐步往更高海拔处蔓延,替代了自然植被,临安区内经营类竹林面积达到了该区域农业用地总面积的 60% 以上,竹笋种植发达;而自然生长的竹林则连片分布,与林地相似,多分布于北苕溪上游(黄湖镇及鸬鸟镇周边)。建设用地占比为 10%,且在空间上显现出聚集性;除临安区的锦城街道、青山湖街道和雅观村外,其余建设用地零星分布于河流附近,且往往是一些规模不大的村庄。水域占比较低,仅为 2.8%。这是由于尽管平原地区河网密布,但多为沟渠,且整个水系的源头河流水量较小,许多小支流的河道宽度甚至不足 2 m。

对 57 个子流域的景观类型占比进行统计(图 3)表明,农业用地占比较高的子流域多位于南苕溪主要支流南溪流经的区域,对照实地考察结果,发现竹林在这片区域的种植范围相当广。建设用地占比较高的子流域多位于研究区中部,且建设用地位于子流域范围内呈聚集分布。林地作为东苕溪上游子流域的优势斑块,在 90% 的子流域中占比都超过了一半,这表明东苕溪上游源头区人类干扰强度较低,原生植被保留情况较好。

2.2 东苕溪上游水质时空变化

2.2.1 东苕溪上游水质时间变化 通过两个时期河流水质的监测结果(表 1)可以发现,整体样本的中位数均小于均值,即水质样本中多数监测点的氮、磷浓度较低,同时偏度和峰度值也表明存在部分极大值使得污染物的整体水平增高。对比汛期(6 月)与非汛期(12 月)水质的时间变化,可以发现非汛期河流氮、磷污染物浓度高于汛期,这与已有研究结论相似^[35]。根据均值对东苕溪上游子流域水质进行评价,对比《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002),发现整体上氨氮在汛期达到Ⅰ类水标准,在非汛期达到Ⅱ类水标准,监测结果

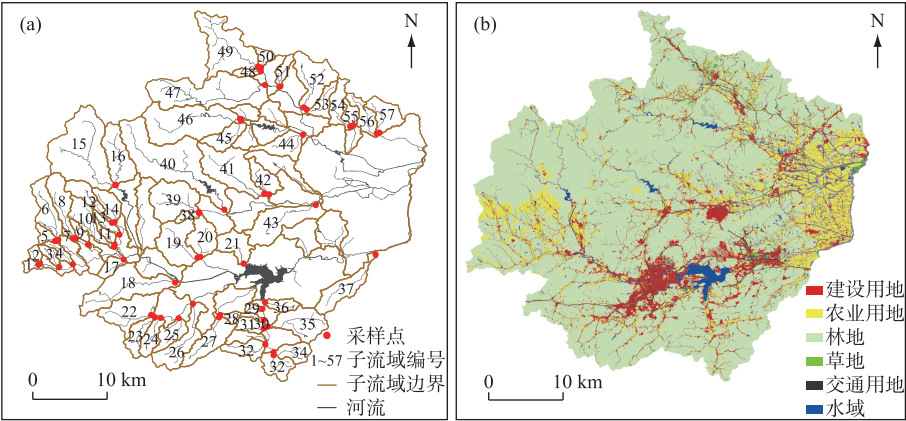


图 2 东苕溪上游子流域及采样点分布(a)和景观类型(b)

Fig.2 Distribution of sub-watersheds and sampling sites (a) and land use map (b) of the upper reaches of Dongtiaoxi River

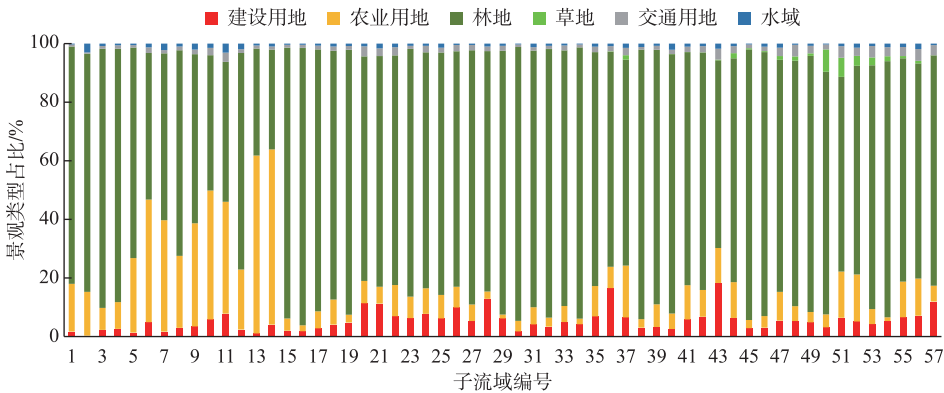


图 3 东苕溪子流域景观类型占比

Fig.3 Percentage of landscape types in sub-watersheds of Dongtiaoxi River

表 1 东苕溪上游采样点水质指标的描述性统计*

Tab.1 Descriptive statistics of water quality of sampling sites in the upper reaches of Dongtiaoxi River

水质 指标	时间	最小值/ (mg/L)	最大值/ (mg/L)	均值/ (mg/L)	中位数/ (mg/L)	标准差/ (mg/L)	变异系 数/%	偏度	峰度	GB 3838—2002 标准限值/(mg/L)				
										I 类	II 类	III 类	IV 类	V 类
NH ₃ -N	6 月	0.001	2.280	0.130 ^a	0.028	0.322	248.215	5.638	36.701	≤0.15	≤0.5	≤1.0	≤1.5	≤2.0
	12 月	0.027	3.506	0.304 ^a	0.101	0.595	196.043	3.924	17.012					
NO ₃ ⁻ -N	6 月	0.167	4.779	1.834 ^a	1.571	1.231	67.143	0.939	0.056					
	12 月	0.170	15.866	2.488 ^a	1.762	2.354	94.631	3.677	18.433					
TN	6 月	0.478	6.045	2.310 ^a	2.072	1.323	57.263	0.873	0.198	≤0.2	≤0.5	≤1.0	≤1.5	≤2.0
	12 月	0.436	19.736	3.335 ^b	2.503	2.685	80.508	4.310	24.940					
TP	6 月	未检出	0.371	0.077 ^a	0.062	0.070	91.925	2.172	5.828	≤0.02	≤0.1	≤0.2	≤0.3	≤0.4
	12 月	0.005	0.616	0.082 ^a	0.059	0.099	121.271	3.497	15.293					

* 不同小写字母上标表示河流水质指标在不同月份间存在显著差异, $P < 0.05$.

符合《浙江省水功能区水环境功能区划分方案(2015)》中对饮用水源保护区的水质要求^[36]。与此同时,硝态氮和总氮浓度仍相对较高,其中总氮在两个监测月份的均值均远超《地表水环境质量标准》中Ⅴ类水质限值。而总磷浓度在两个监测时期均达到了Ⅱ类水质标准,这表明东苕溪上游水源区磷污染程度较轻。

考虑到降水对地表径流造成的影响,本研究统计了2009—2018年的年平均月降水量及2019年当年月降水量,对比发现,监测年份汛期采样的6月及采样前两个月的降水量分布均与往年规律一致,地表径流过程未见异常;而在监测年份非汛期的10和11月,降水量仅为近10年月均降水量的1/4,而本研究中的非汛期采样为12月中旬,受前两个月降水显著偏低的影响,河流水位低,流速平缓,一定程度上导致了污染物的滞留。通过 t 检验分析降水量对氮、磷污染物浓度的影响,发现降水量与总氮浓度的关系表现为差异显著,而其余指标在汛期和非汛期与降水量的关系均表现为差异不显著。

2.2.2 东苕溪上游水质空间变化 流域景观格局的空间异质性导致了河流不同位置水质的变化^[3],形成特定的水质空间格局。从东苕溪上游河流水质指标浓度的空间分布(图4)可以看出,大部分采样点的氨氮浓度均低于0.2 mg/L。氨氮的低值多出现于临安区的太湖源镇附近及余杭区的鸬鸟镇和百丈镇周边,上述区域在《浙江省水功能区水环境功能区划分方案(2015)》中被划分为饮用水源保护区,对河流水环境的保护力度较大。中苕溪虽然零星分布有制造业和轻工业,但随着近几年“五水共治”的推行,污染情况已有了很大的改善。氨氮的高值主要出现于人口密度较大的城镇区域,其中,大于0.6 mg/L的值较少,对应采样点位于板桥镇和临安城区附近。

硝态氮高值绝大部分出现在南苕溪上游的南溪流域(太湖源镇),其主要来源为农业用地的面源污染。雷竹作为特色经济林在南苕溪上游太湖源镇种植广泛,其经营性管理伴随着高强度施肥和松土等措施,氮、磷养分极易在雨后随着地表径流汇入河流之中^[37-39],造成南溪的硝态氮浓度整体偏高。北苕溪上游双溪镇的竹海则与南溪经营性的竹林不同,多为自然生长,施肥等人工管理措施较少,因此硝态氮浓度较低。

总氮的高值更多地出现在农业用地连片分布的区域。在本研究区内,总氮主要由氨氮和硝态氮构成,水体中有机氮和其他含氮离子浓度较低,因此其极高值与硝态氮分布一致,集中于南溪流域附近,同时也出现在锦溪和灵溪的部分农业用地集中分布区域。

总磷浓度在0.1 mg/L以下的采样点占到了80%以上,这表明东苕溪上游源头溪流大部分区域的总磷达到了Ⅱ类以上水质标准,磷污染整体较低。总磷高值多出现在建设用地密集的区域,如南溪汇入青山湖前的临安城区以及板桥镇和黄湖镇,这些区域分布有不少工业和工厂,间接证明了点源污染对总磷的贡献程度。

2.3 东苕溪上游河流水质对景观格局的响应分析

2.3.1 河流水质与景观格局的相关性分析 通过57个子流域的景观组成与水质指标的相关性分析结果(表2)可以发现,在汛期,氨氮、总磷浓度与建设用地占比呈极显著正相关,随着子流域范围内的建设用地增加,河流水质的污染程度也在增加。硝态氮、总氮浓度均与农业用地占比呈极显著正相关,与林地占比呈极显著负相关。这是因为农业用地占比在某种程度上反映了该区域范围内面源污染的强度^[40],尤其是在竹林密布的区域,这种现象尤为明显,河流水体中硝态氮和总氮绝大部分来自人工经营竹林带来的氮污染。林地作为一种“汇”景观,其对河流水质的净化和对污染物的削减作用已在不少研究中得到了证实^[34,41-43],子流域内林地占比的增加能很好地降低水质的污染程度。同时,对农业种植施肥措施的管控和农田土壤养分流失的改善也是提升流域内水质的有效方法之一。

在非汛期,仅总磷浓度与建设用地占比呈极显著正相关,其余指标间相关性均未达到显著性水平。导致汛期和非汛期相关性结果差异的原因可能是12月处于冬季,人为的耕作活动减少,施肥强度降至最低,因而硝态氮、总氮浓度未显示出与农业用地面积的显著相关性;同时采样年本研究区的冬季降水量显著低于往年(仅为近10年同期平均降水量的1/4),这也使得由降水带来的地表径流过程受阻,氮、磷污染物在部分河段产生了滞留和累积现象,造成了景观组成对河流水质影响的波动性。

景观空间配置指标与水质指标的相关性(表3)表明,在汛期,硝态氮、总氮浓度与LPI、CONTAG呈极显著负相关,与DIVISION、SHDI呈极显著正相关;PAFRAC与所有的水质指标均表现出显著负相关。可以认为,在子流域尺度上,LPI、CONTAG、DIVISION、SHDI和PAFRAC对研究区汛期的河流水质有较强的解释能力,这

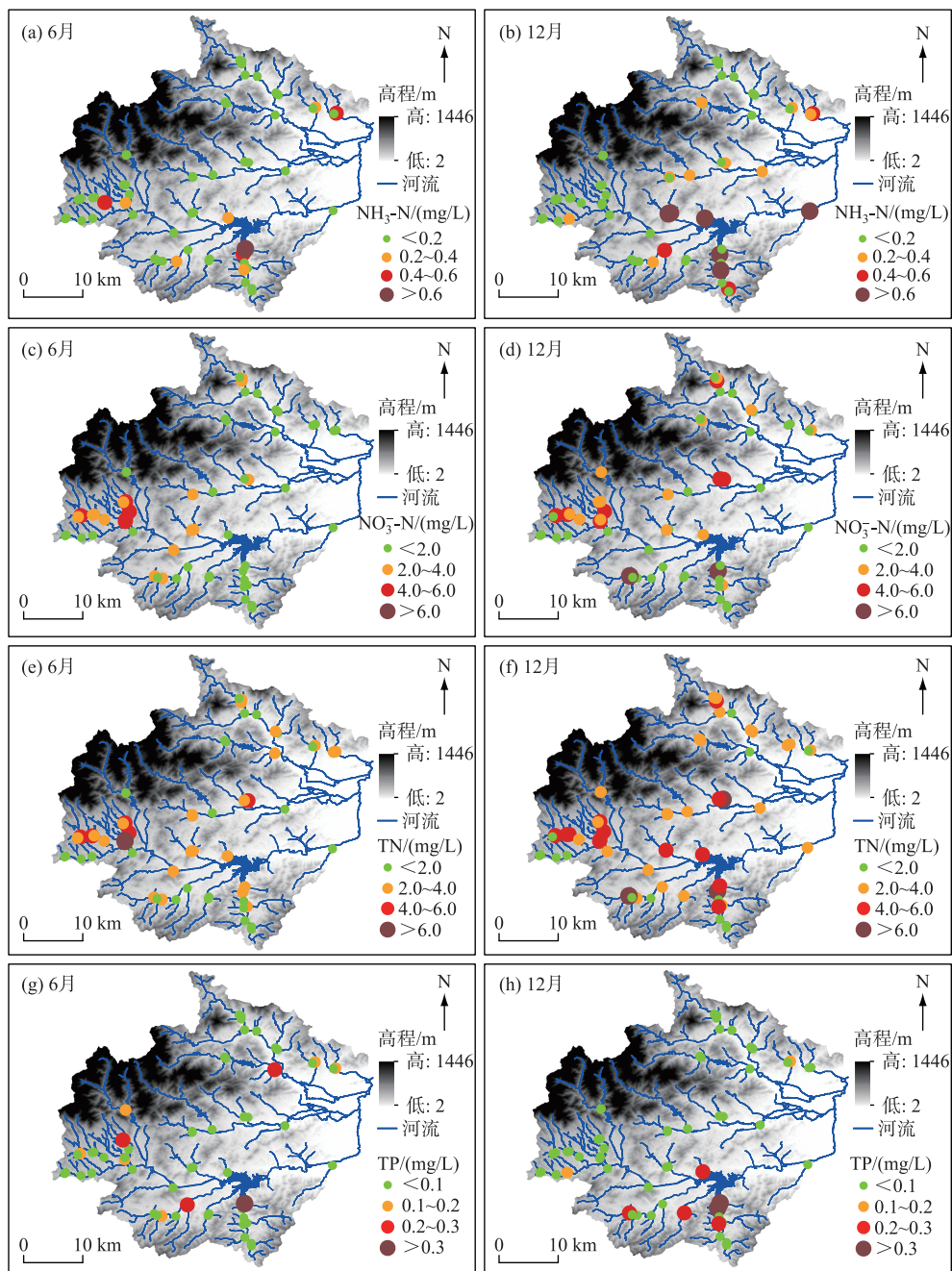


图4 东苕溪上游河流水质指标浓度的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of water quality index concentration in the upper reaches of Dongtiao River

在已有的研究中有相似结论^[44]. 而在非汛期, 所有景观指数中仅有 *PAFRAC* 表现出与水质指标的显著相关性, 且这种相关性比汛期时强.

表 2 东苕溪流域景观类型占比与水质指标的相关性分析
Tab.2 Correlation analysis of percentages of land use and water quality indexes
of sub-watersheds of Dongtiaoxi River

水质指标	时间	建设用地占比	农业用地占比	林地占比	草地占比	交通用地占比	水域占比
NH ₃ -N	6 月	0.499 **	-0.031	-0.096	-0.172	0.080	0.074
	12 月	0.171	-0.202	0.166	-0.255	0.023	0.020
NO ₃ ⁻ -N	6 月	-0.023	0.584 **	-0.564 **	-0.104	0.023	0.261 *
	12 月	0.040	0.117	-0.118	-0.171	0.047	0.058
TN	6 月	0.105	0.591 **	-0.617 **	-0.120	0.104	0.364 **
	12 月	0.144	0.050	-0.084	-0.219	0.092	0.060
TP	6 月	0.371 **	0.289 *	-0.374 **	-0.092	0.030	-0.065
	12 月	0.365 **	-0.129	0.046	-0.197	0.027	0.009

* 表示 $P<0.05$; ** 表示 $P<0.01$.

表 3 东苕溪流域景观格局指数与水质指标的相关性分析
Tab.3 Correlation analysis of sub-watersheds' landscape pattern indexes
and water quality indexes of Dongtiaoxi River

水质指标	时间	<i>PD</i>	<i>LPI</i>	<i>ED</i>	<i>LSI</i>	<i>PAFRAC</i>	<i>CONTAG</i>	<i>IJI</i>	<i>DIVISION</i>	<i>SHDI</i>	<i>AI</i>
NH ₃ -N	6 月	0.046	-0.064	0.103	-0.098	-0.303 *	-0.150	-0.152	0.077	0.181	-0.095
	12 月	-0.092	0.230	-0.124	-0.127	-0.310 *	0.133	0.041	-0.209	-0.122	0.135
NO ₃ ⁻ -N	6 月	-0.043	-0.379 **	0.156	0.006	-0.272 *	-0.444 **	0.133	0.392 **	0.394 **	-0.163
	12 月	-0.014	0.001	0.005	-0.060	-0.284 *	-0.081	0.055	-0.033	0.051	-0.002
TN	6 月	0.069	-0.423 **	0.292 *	0.055	-0.299 *	-0.543 **	0.017	0.444 **	0.504 **	-0.296 *
	12 月	0.005	0.045	0.020	-0.056	-0.337 *	-0.074	0.041	-0.065	0.057	-0.013
TP	6 月	0.135	-0.125	0.204	-0.016	-0.264 *	-0.286 *	-0.215	0.143	0.303 *	-0.205
	12 月	0.003	0.225	-0.014	-0.227	-0.381 **	0.005	-0.015	-0.234	-0.020	0.026

* 表示 $P<0.05$; ** 表示 $P<0.01$.

2.3.2 景观格局与河流水质的冗余分析 基于子流域的景观组成和景观配置与河流水质指标的冗余分析结果(表 4,图 5)表明,所选择指标对河流水质的总解释率均较高,6 月和 12 月分别达到了 78.70% 和 82.14% (表 4). 从 RDA 排序图(图 5)中可以发现,所有的水质指标与 *PAFRAC* 及林地占比都表现出不同程度的负相关关系. 其中,*PAFRAC* 代表着人类干扰的强弱程度,这表明河流水污染的最大成因是各种各样的人类活动;林地面积的增加和斑块形状复杂性的提高有利于改善水质,而建设用地面积的增加则会导致氨氮、总磷浓度升高. *SHDI*、*DIVISION*、*CONTAG*、*IJI* 虽能在一定程度上影响水质,但其作用并不显著.

表 4 东苕溪流域景观格局与河流水质的冗余分析结果
Tab.4 RDA results of landscape pattern and water quality based on sub-watersheds of Dongtiaoxi River

时间	解释度/%					pseudo- <i>F</i>	<i>P</i> 值
	轴 1	轴 2	轴 3	轴 4	所有轴		
6 月	55.01	18.5	4.76	0.42	78.70	2.7	0.014
12 月	62.19	12.16	7.65	0.13	82.14	3.4	0.002

对比两个时期的冗余分析结果,发现仅有建设用地对水质指标的贡献率在汛期和非汛期同时达到了显著($P<0.05$). 造成这一现象的原因可能是分析因子中除景观组成外还纳入了景观配置指标,林地和农业用地等对氮源污染影响较大的景观类型的贡献率被各个格局指数所分散,因此在分析结果中没有得到体现. 除此以外,在非汛期景观配置因子 *LPI* 和 *IJI* 对水质也有一定的解释力,其中 *LPI* 代表最大斑块所占比例,

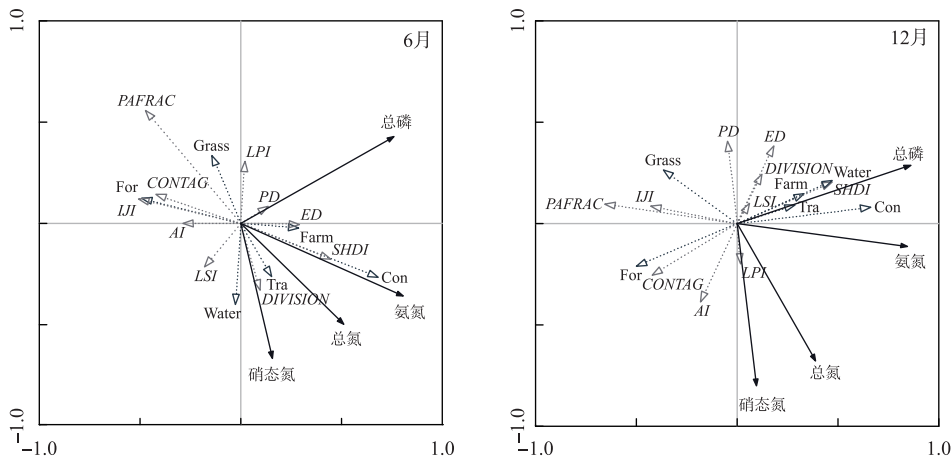


图5 东茗溪子流域景观格局与河流水质的 RDA 排序图 (Con:建设用地占比;Farm:农业用地占比; For:林地占比;Grass:草地占比;Tra:交通用地占比;Water:水域占比)

Fig.5 RDA of landscape pattern and water quality based on sub-watersheds of Dongtiaoxi River

LJI 则表达了景观中不同类型斑块之间的邻近状况,而东茗溪上游子流域的优势斑块为林地,这表明提高林地比例有助于改善水质.

2.3.3 景观类型和格局指数与河流水质指标的逐步回归分析 基于子流域进行水质指标与景观组成和景观配置之间的逐步回归分析(表5),同时对各景观格局参数进行共线性检验. 方差膨胀系数(*VIF*)常用于衡量多元线性回归模型中共线性严重程度,当容差 ≤ 0.1 或 *VIF* 值 ≥ 10 时,代表变量间存在严重的共线性. 检测结果表明,纳入方程的参数的容差介于 0.4~1.0 之间,*VIF* 值范围为 1.0~2.3,即变量间不存在严重的共线性. 进入各个水质回归模型且达到显著性水平($P<0.05$)的景观组成因子有建设用地、林地、农业用地和交通用地占比,景观配置因子有 *PAFRAC*、*PD* 和 *LPI*. 氨氮浓度在汛期主要受建设用地和交通用地占比的影响,说明建设用地面积增大会使氨氮浓度升高,这种关系在地表径流冲刷作用较强的汛期尤为明显;而交通用地占比却与氨氮浓度呈负相关,这可能部分体现了交通用地对污染物的阻隔和引导作用. *PAFRAC* 作为评价景观斑块形状的重要参数,其值越大,景观形状越复杂,受人类活动的影响就越弱. 在非汛期,东茗溪流域降水较少,景观组成对氨氮浓度的贡献程度降低,景观配置指数 *PAFRAC* 成为影响氨氮浓度的最主要因子. 不论是在汛期还是非汛期,农业用地占比均是对硝态氮浓度解释能力最强的影响因素,说明硝态氮主要来源于农业生产的面源污染,景观组成对硝态氮浓度的影响起主导作用. 而总氮浓度的最大影响因子在汛期和

表5 景观类型和格局指数与水质指标的逐步回归分析

Tab.5 Stepwise regression analysis of landscape pattern and water quality

水质指标	时间	回归方程	R^2	调整 R^2	P 值
$\text{NH}_3\text{-N}$	6 月	$\text{NH}_3\text{-N}_{\text{June}} = 0.070 + 0.077\text{Con} - 0.167\text{Tra}$	0.446	0.400	0.001 **
	12 月	$\text{NH}_3\text{-N}_{\text{Dec}} = 6.785 - 4.886\text{PAFRAC}$	0.224	0.192	0.150
$\text{NO}_3\text{-N}$	6 月	$\text{NO}_3\text{-N}_{\text{June}} = 1.159 + 0.052\text{Farm}$	0.341	0.329	0.000 **
	12 月	$\text{NO}_3\text{-N}_{\text{Dec}} = 1.567 + 0.038\text{Farm}$	0.191	0.175	0.001 **
TN	6 月	$\text{TN}_{\text{June}} = 6.865 - 0.058\text{For}$	0.381	0.369	0.000 **
	12 月	$\text{TN}_{\text{Dec}} = 5.667 - 0.035\text{For}$	0.132	0.116	0.006 **
TP	6 月	$\text{TP}_{\text{June}} = -0.043 + 0.019\text{Con} - 0.066\text{Tra} + 0.001\text{PD} + 0.002\text{LPI}$	0.575	0.498	0.001 **
	12 月	$\text{TP}_{\text{Dec}} = -0.004 + 0.010\text{Con}$	0.384	0.359	0.001 **

* 表示 $P<0.05$; ** 表示 $P<0.01$; June: 6 月 (汛期); Dec: 12 月 (非汛期); Con: 建设用地占比; Farm: 农业用地占比; For: 林地占比; Tra: 交通用地占比.

非汛期均为林地占比,林地面积的增加能够显著降低河流总氮浓度,且林地作为关键的“汇”景观,对河流中污染物的削减作用在汛期更显著。总磷浓度在汛期和非汛期都表现出了和建设用地占比的正相关关系,但在汛期其浓度还受到交通用地占比及景观指数 PD 和 LPI 的影响。

3 结论

1) 东苕溪上游区域,氨氮和总磷浓度整体较低,可达Ⅰ类水质标准;而总氮浓度较高,在大多数子流域高于地表水质量标准中Ⅴ类水质标准限值,同时硝态氮浓度在农业集中区域也较高。从时间上来看,非汛期(12月)的水质污染程度高于汛期(6月);从空间上看,氨氮和总磷高值集中在城镇建设用地连片分布的区域;而硝态氮和总氮污染最严重的河段多为雷竹等特色经济林种植集中连片的区域。

2) 景观格局对河流水质的影响在汛期和非汛期差异明显。景观组成对水质的影响主要表现为:在汛期,建设用地占比与氨氮和总磷浓度呈显著正相关关系,农业用地对硝态氮、总氮浓度的贡献显著,林地则对硝态氮、总氮浓度的削减作用明显;而在非汛期,景观组成对河流水质的影响明显弱于汛期。景观配置对水质的影响表现为:在汛期, LPI 、 $CONTAG$ 、 $DIVISION$ 、 $SHDI$ 和 $PAFRAC$ 对水质具有较强的解释能力;而在非汛期仅 $PAFRAC$ 表现出与水质指标的显著相关性,且强于汛期。

3) 不论是在汛期还是非汛期,耕地和林地占比均分别是硝态氮和总氮浓度的最直接影响因素,而氨氮和总磷浓度的主要影响因子在汛期和非汛期有所差别,但建设用地的影响最广泛;林地和草地对河流中污染物具有一定的削减作用,特别是林地对硝态氮和总氮具有显著的景观“汇”功能,能有效改善河流水质。

4) 整体来看,氮、磷污染物浓度的高低与景观类型和空间配置密切相关,增加景观连通性、降低自然景观的破碎化程度也是有效改善河流水环境的措施之一。

4 参考文献

- [1] Duda AM, El-Ashry MT. Addressing the global water and environment crises through integrated approaches to the management of land, water and ecological resources. *Water International*, 2000, **25** (1): 115-126. DOI: 10.1080/02508060008686803.
- [2] Giri S, Qiu ZY. Understanding the relationship of land uses and water quality in Twenty First Century: A review. *Journal of Environmental Management*, 2016, **173**: 41-48. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.02.029.
- [3] Xiao HG, Ji W. Relating landscape characteristics to non-point source pollution in mine waste-located watersheds using geospatial techniques. *Journal of Environmental Management*, 2007, **82**(1): 111-119. DOI: 10.1016/j.jenvman.2005.12.009.
- [4] Chen LD, Fu BJ, Zhao WW. Source-sink landscape theory and its ecological significance. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, **26**(5): 1444-1449. [陈利顶, 傅伯杰, 赵文武. “源”“汇”景观理论及其生态学意义. 生态学报, 2006, **26**(5): 1444-1449.]
- [5] Verburg PH, van de Steeg J, Veldkamp A *et al.* From land cover change to land function dynamics: A major challenge to improve land characterization. *Journal of Environmental Management*, 2009, **90**(3): 1327-1335. DOI: 10.1016/j.jenvman.2008.08.005.
- [6] Geng RZ, Li MT, Wang XY *et al.* Effect of land use/landscape changes on diffuse pollution load from watershed based on SWAT model. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, **31**(16): 241-250. [耿润哲, 李明涛, 王晓燕等. 基于 SWAT 模型的流域土地利用格局变化对面源污染的影响. 农业工程学报, 2015, **31**(16): 241-250.]
- [7] Uriarte M, Yackulic CB, Lim Y *et al.* Influence of land use on water quality in a tropical landscape: A multi-scale analysis. *Landscape Ecology*, 2011, **26**(8): 1151-1164. DOI: 10.1007/s10980-011-9642-y.
- [8] Liu LJ, Li XY, He XY. Advances in the studying of the relationship between landscape pattern and river water quality at the watershed scale. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(19): 5460-5465. [刘丽娟, 李小玉, 何兴元. 流域尺度上的景观格局与河流水质关系研究进展. 生态学报, 2011, **31**(19): 5460-5465.]
- [9] Zhao J, Yang K, Tai J *et al.* Review of the relationship between regional landscape pattern and surface water quality. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(11): 3180-3189. [赵军, 杨凯, 邵俊等. 区域景观格局与地表水环境质量关系研究进

- 展. 生态学报, 2011, **31**(11): 3180-3189.]
- [10] Chen JB, Lu J. Effects of land use, topography and socio-economic factors on river water quality in a mountainous watershed with intensive agricultural production in East China. *PLoS One*, 2014, **9**(8): e102714. DOI: 10.1371/journal.pone.0102714.
- [11] Bu HM, Meng W, Zhang Y *et al.* Relationships between land use patterns and water quality in the Taizi River basin, China. *Ecological Indicators*, 2014, **41**: 187-197. DOI: 10.1016/j.ecolind.2014.02.003.
- [12] Liu J, Shen ZY, Chen L. Assessing how spatial variations of land use pattern affect water quality across a typical urbanized watershed in Beijing, China. *Landscape and Urban Planning*, 2018, **176**: 51-63. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2018.04.006.
- [13] Sun RH, Wang Z, Chen LD *et al.* Assessment of surface water quality at large watershed scale: Land-use, anthropogenic, and administrative impacts. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 2013, **49**(4): 741-752. DOI: 10.1111/jawr.12033.
- [14] Xu GY, Ren XD, Yang ZH *et al.* Influence of landscape structures on water quality at multiple temporal and spatial scales: A case study of Wujiang river watershed in Guizhou. *Water*, 2019, **11**(1): 159. DOI: 10.3390/w11010159.
- [15] Xie YJ, Yu XJ, Ng NC *et al.* Exploring the dynamic correlation of landscape composition and habitat fragmentation with surface water quality in the Shenzhen river and deep bay cross-border watershed, China. *Ecological Indicators*, 2018, **90**: 231-246. DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.11.051.
- [16] Yu DY, Shi PJ, Liu YP *et al.* Detecting land use-water quality relationships from the viewpoint of ecological restoration in an urban area. *Ecological Engineering*, 2013, **53**: 205-216. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2012.12.045.
- [17] Wang Y, Shi AJ. Response space relationship research between landuse distributing and surface water quality in Beijing. *Environmental Monitoring in China*, 2012, **28**(3): 58-62. [王瑶, 石爱军. 北京市土地利用分布与水质响应空间关系研究. 中国环境监测, 2012, **28**(3): 58-62.]
- [18] Taihu Lake Basin Authority of Ministry of water resources, Compilation Committee of "Taihu chronicles" ed. Taihu chronicles. Beijing: China Water & Power Press, 2018: 29-31. [水利部太湖流域管理局, 《太湖志》编纂委员会. 太湖志. 北京: 中国水利水电出版社, 2018: 29-31.]
- [19] Zhu GW, Zou W, Guo CX *et al.* Long-term variations of phosphorus concentration and capacity in Lake Taihu, 2005-2018: Implications for future phosphorus reduction target management. *J Lake Sci*, 2020, **32**(1): 21-35. DOI: 10.18307/2020.0103. [朱广伟, 邹伟, 国超旋等. 太湖水体磷浓度与赋存量长期变化(2005—2018年)及其对未来磷控制目标管理的启示. 湖泊科学, 2020, **32**(1): 21-35.]
- [20] Wu SQ, Wu XF, Dai JY *et al.* eds. Monitoring and assessment of water ecological impact of major pollution control projects in Taihu Basin. Beijing: Science Press, 2019: 31-32. [吴时强, 吴修锋, 戴江玉等. 太湖流域重大治污工程水生态影响监测与评估. 北京: 科学出版社, 2019: 31-32.]
- [21] Zhu XY, Jiang CP, Ma XY *et al.* Water quantity, quality and pollutant flux of inbound and outbound water in Zhejiang area of Taihu Basin. *J Lake Sci*, 2020, **32**(3): 629-640. DOI: 10.18307/2020.0304. [朱昕阳, 蒋彩萍, 马晓雁等. 太湖流域浙江片区出入境水量、水质及污染物通量. 湖泊科学, 2020, **32**(3): 629-640.]
- [22] Hangzhou Local Chronicles Compilation Committee ed. Hangzhou chronicles (Volume I). Beijing: Zhonghua Book Company, 1995: 308-314. [杭州市地方志编纂委员会. 杭州市志(第一卷). 北京: 中华书局, 1995: 308-314.]
- [23] Compilation Committee of "Records of Tiaoxi and Beijing-Hangzhou Grand Canal" ed. Records of Tiaoxi and Beijing-Hangzhou Grand Canal. Beijing: China Water & Power Press, 2010: 255-265. [《苕溪运河志》编纂委员会. 苕溪运河志. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 255-265.]
- [24] Department of Water Resources of Zhejiang Province. Handbook of rivers in Zhejiang Province. Beijing: China Water & Power Press, 2016: 5-18. [浙江省水利厅. 浙江省河流手册. 北京: 中国水利水电出版社, 2016: 5-18.]
- [25] Xu BB, Lu F, Huang QH *et al.* Forms of nitrogen and phosphorus and their spatial variability in East Tiaoxi River. *China Environmental Science*, 2016, **36**(4): 1181-1188. [徐兵兵, 卢峰, 黄清辉等. 东苕溪水体氮、磷形态分析及其空间差异性. 中国环境科学, 2016, **36**(4): 1181-1188.]
- [26] Cai LM, Tian XZ, He XL. Evaluation on water quality changes of Dongtiaoxi water source in Hangzhou City and its protection under river chief system. *China Water Resources*, 2019, (15): 33-36. [蔡临明, 田玺泽, 何小龙. "五水共治"下杭州市东苕溪水源地水质变化分析及保护建议. 中国水利, 2019, (15): 33-36.]

- [27] Lu RJ, Wang Y, Wu JS *et al.* Effect of management intensity on runoff losses of nitrogen and phosphorus in bamboo forests in Zhejiang Province. *Journal of Natural Resources*, 2019, **34**(6): 1296-1305. DOI: 10.31497/zrzyxb.20190614. [陆荣杰, 王莺, 吴家森等. 不同经营方式毛竹林氮流失年动态规律. 自然资源学报, 2019, **34**(6): 1296-1305.]
- [28] Molina MC, Roa-Fuentes CA, Zeni JO *et al.* The effects of land use at different spatial scales on instream features in agricultural streams. *Limnologia*, 2017, **65**: 14-21. DOI: 10.1016/j.limno.2017.06.001.
- [29] Delpla I, Rodriguez MJ. Effects of future climate and land use scenarios on riverine source water quality. *Science of the Total Environment*, 2014, **493**: 1014-1024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.06.087.
- [30] Ding J, Jiang Y, Liu Q *et al.* Influences of the land use pattern on water quality in low-order streams of the Dongjiang River basin, China: A multi-scale analysis. *Science of the Total Environment*, 2016, **551/552**: 205-216. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.01.162.
- [31] Shi P, Zhang Y, Li ZB *et al.* Influence of land use and land cover patterns on seasonal water quality at multi-spatial scales. *CATENA*, 2017, **151**: 182-190. DOI: 10.1016/j.catena.2016.12.017.
- [32] Zhang J, Li SY, Dong RZ *et al.* Influences of land use metrics at multi-spatial scales on seasonal water quality: A case study of river systems in the Three Gorges Reservoir Area, China. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **206**: 76-85. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.09.179.
- [33] Šmilauer P, Lepš J eds. Experimental design. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO 5. Cambridge: Cambridge University Press, 2014: 39-49.
- [34] Xiang S, Pang Y, Dou JS *et al.* Impact of land use on the water quality of inflow river to Erhai Lake at different temporal and spatial scales. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(3): 876-885. DOI: 10.5846/stxb201612192610. [项颂, 庞燕, 窦嘉顺等. 不同时空尺度下土地利用对洱海入湖河流水质的影响. 生态学报, 2018, **38**(3): 876-885.]
- [35] Xu QY, Wang P, Wang T *et al.* Investigation of the impacts of land use structure and landscape pattern on water quality in the Ganjiang River, Lake Poyang Basin. *J Lake Sci*, 2020, **32**(4): 1008-1019. DOI: 10.18307/2020.0410. [徐启渝, 王鹏, 王涛等. 土地利用结构与景观格局对鄱阳湖流域赣江水质的影响. 湖泊科学, 2020, **32**(4): 1008-1019.]
- [36] Zhejiang Environmental Protection Bureau. Division scheme of water environment functional areas in Zhejiang Province, 2015. http://sthjt.zj.gov.cn/z7fac.ipv6.onewocloud.cn/art/2016/5/26/art_1229007995_13095800.html, 2016-05-26. [浙江省环境保护厅. 浙江省水功能区水环境功能区划分方案, 2015.]
- [37] Tu LH, Hu TX, Zhang J *et al.* Nitrogen distribution and cycling through water flows in a subtropical bamboo forest under high level of atmospheric deposition. *PLoS One*, 2013, **8**(10): e75862. DOI: 10.1371/journal.pone.0075862.
- [38] Zhang QC, Shamsi IH, Wang JW *et al.* Surface runoff and nitrogen (N) loss in a bamboo (*Phyllostachys pubescens*) forest under different fertilization regimes. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(7): 4681-4688. DOI: 10.1007/s11356-012-1429-4.
- [39] Zhang QC, Wang XQ, Lou LP *et al.* Studies on surface runoff and nitrogen loss in bamboo forest ecosystem. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, **24**(5): 23-26. [张奇春, 王雪芹, 楼莉萍等. 毛竹林生态系统地表径流及其氮素流失形态研究. 水土保持学报, 2010, **24**(5): 23-26.]
- [40] Li JR, Chen LD, Guo XD *et al.* Effects of land use structure on non-point source pollution. *China Environmental Science*, 2000, **20**(6): 506-510. [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. 中国环境科学, 2000, **20**(6): 506-510.]
- [41] Cai H, Lin GM, Kang WH. The effects of sloping landscape features on water quality in the upper and middle reaches of the Chishui River Watershed. *Geographical Research*, 2018, **37**(4): 704-716. DOI: 10.11821/dlyj201804005. [蔡宏, 林国敏, 康文华. 赤水河流域中上游坡地景观特征对河流水质的影响. 地理研究, 2018, **37**(4): 704-716.]
- [42] Zhang B, Wang SH, Jiang X *et al.* Response relationship research between land use patterns and water quality in Danjiangkou Reservoir. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(9): 1303-1310. [张博, 王书航, 姜霞等. 丹江口库区土地利用格局与水质响应关系. 环境科学研究, 2016, **29**(9): 1303-1310.]
- [43] Hu J, Liu MS, Zhou W *et al.* Correlations between water quality and land use pattern in Taihu Lake Basin. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(6): 1190-1197. DOI: 10.13292/j.1000-4890.2011.0213. [胡建, 刘茂松, 周文等. 太湖流域水质状况与土地利用格局的相关性. 生态学杂志, 2011, **30**(6): 1190-1197.]
- [44] Yang SS, Tang CW, Liu LJ *et al.* Relationships between river water quality and land use type at watershed scale. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, **24**(7): 1953-1961. DOI: 10.13287/j.1001-9332.2013.0431. [杨莎莎, 汤萃文, 刘丽娟等. 流域尺度上河流水质与土地利用的关系. 应用生态学报, 2013, **24**(7): 1953-1961.]