

九龙江流域城镇建设用地与河流水质关系研究

孙芹芹^{1,2}, 黄金良^{1*}, 洪华生^{1,2}, 冯媛¹

(1. 厦门大学环境科学研究中心, 厦门 361005; 2. 厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室, 厦门 361005)

摘要:基于波段组合指数与单波段特征相结合的方法对九龙江流域城镇建设用地的提取, 并采用景观生态学与统计分析方法, 分别对流域内城镇建设用地的面积百分比及景观格局指数与水体中的高锰酸盐指数、 NH_4^+ -N、TP 浓度变化之间的关系进行研究。结果表明, 流域内城镇建设用地的面积百分比与高锰酸盐指数、 NH_4^+ -N、TP 呈现显著正相关 (r 为 0.701、0.695、0.789), 城镇建设用地的最大斑块指数 (LPI) 与高锰酸盐指数、 NH_4^+ -N、TP 浓度呈现显著正相关 (r 为 0.555、0.643、0.722), 城镇建设用地的景观形状指数 (LSI) 与高锰酸盐指数、TP 浓度呈现正相关 (r 为 0.564、0.553), 说明城镇建设用地的对水质的影响不仅与其在流域内的面积比例有关, 而且与其空间格局关系密切。季节性关联分析发现, 随着城镇建设用地的增多, 在丰水期和枯水期的水质恶化过程较快, 是水华易发的敏感时期; 各小流域的水环境质量处于受影响状态, 位于九龙江源头的龙门溪、苏溪、小溪流域城镇建设用地比例较高 (9% ~ 16%), 需及时进行城市化进程的调整和控制。

关键词:九龙江; 流域; 城镇建设用地; 景观; 水质

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)10-2849-06

Study on the Linkage Between Urban Built-Up Land and Water Quality in the Jiulong River Watershed

SUN Qin-qin^{1,2}, HUANG Jin-liang¹, HONG Hua-sheng^{1,2}, FENG Yuan¹

(1. Environmental Science Research Center, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Band grouping indices combined with single band characteristic were used to extract urban built-up land based on satellite image in the Jiulong River Watershed. Landscape ecology method and statistical analysis were employed to explore the relationship between urban built-up land and permanganate index, NH_4^+ -N, TP concentrations. There were significantly positive correlations between the proportion of urban built-up land and permanganate index, NH_4^+ -N, TP ($r = 0.701, 0.695, 0.789$). It indicates the proportion of urban built-up land areas in the sub-watershed could be an effective indicator of water quality. The largest patch index (LPI) was positively correlated to permanganate index, NH_4^+ -N, TP concentrations in the water ($r = 0.555, 0.643, 0.722$). The landscape shape index (LSI) was positively correlated to permanganate index and TP concentrations in the water ($r = 0.564, 0.553$). These means the impacts of urban built-up land on water quality are influenced not only by urban built-up land areas but also by spatial patterns. The seasonally linear correlation results show that water quality deteriorates quickly with urban built-up land during the flood season and dry season, and the water is susceptible to eutrophication in both flood and dry seasons. The water quality in most sub-watersheds are impacted by urban built-up land, while the urban built-up land areas of Longmen stream, Su stream and Xiao stream located in headstreams are intensive, which need to be adjusted and controlled to protect the water quality.

Key words: Jiulong River; watershed; urban built-up land; landscape; water quality

城市的扩张使得原来以植被为主的自然景观被城市不透水地面所取代^[1], 城市化过程中建设用地的增加, 阻碍了地表水的截留与下渗, 城市地表沉积的废弃物、灰尘颗粒以及病原性物质等在径流冲刷过程中部分或全部汇入受纳水体, 对水质造成污染^[2,3]。国内外对城市化与水环境质量的研究主要从社会经济水平^[4,5]、城镇用地面积和不透水地面比例^[6-9]等方面展开。流域内的城镇建设用地的不透水面的面积百分比对一个地区的水环境质量有较强的指示作用, 但是城市化的生态效应往往无法仅从城镇建设用地的数量上反映, 而与其空间分布有一定的关系^[10-12], 因此在研究城市土地利用与水

质相关性时, 需要同时考虑城市用地类型的空间格局特征。

目前对全流域土地利用格局与水质关系的研究已经开展^[13-17], 国内外对流域土地利用景观与水质之间的关系也进行了一定的研究, 但是对城镇空间格局与水质变化之间关系的研究较少^[18]。本研究正是在此基础上, 利用 Landsat 卫星影像和水质监测

收稿日期: 2010-11-19; 修订日期: 2011-01-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40901100, 40810069004); 福建省自然科学基金项目 (2009J01222)

作者简介: 孙芹芹 (1983 ~), 女, 博士后, 主要研究方向为土地利用与水质时空变化的分析, E-mail: qqsun@xmu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: jlhuang@xmu.edu.cn

数据,对城镇建设用地面积及景观分布格局与河流水质之间的关系进行分析,以期为该地区迅速发展的城市化背景下水环境安全的控制提供建议.

1 研究区域及数据来源

九龙江流域位于我国东南沿海经济发展迅速的福建省内,流域面积约 $1.47 \times 10^4 \text{ km}^2$,流域内水系发达,属于典型的亚热带中小流域(图 1). 随着台湾海峡西岸经济区建设步伐的加快,流域内城市化进程快,部分小流域城镇建设用地增长速度快,例如位于九龙江源头的苏溪小流域城镇建设用地面积比例已超过 15%.

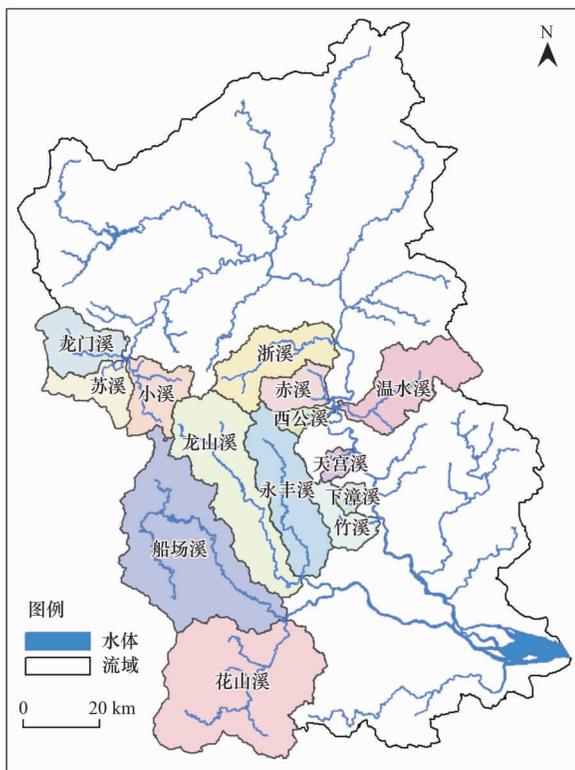


图 1 九龙江 14 个目标支流水系位置示意

Fig.1 Location of 14 sub-watersheds in the Jiulong River Watershed

支流输入作为河流水质污染的主要来源之一,对河流的水质安全控制起着关键作用. 在 ArcGIS 中基于 DEM 数据进行支流小流域的划分,各小流域相对独立,可以准确地分析城镇建设用地与水质之间的关系. 研究中使用的水质监测数据(高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TP)主要来自福建省环境保护局 2007 年每 2 个月一次的九龙江水质采样数据,遥感数据为 2007 年的 Landsat TM 卫星影像,影像成像时天气晴朗,基本无云覆盖. 影像质量较好,并在使用前

经过坐标系转换和几何校正.

2 研究方法

2.1 各小流域城镇建设用地的提取

城镇建设用地主要包括城镇居住与商业用地、教育科研用地、农村居民地、交通道路、工业用地等类型,其明显特征是地表被非渗水面全部或部分覆盖. 基于 Landsat TM 的归一化建筑指数(NDBI)表示一个地区被城镇建设用地覆盖的程度,可以较为客观、准确地提取一个地区的城镇用地^[19],归一化水体指数(MNDWI)则对水体具有很好的识别作用^[20]. 研究表明,NDBI 指数法用于提取城镇用地信息确实是一种有效的方法^[21],在此基础上以归一化水体指数、归一化植被指数(NDVI)和单波段光谱特征作为辅助,从而可实现精确提取城镇建设用地的目标. NDBI、MNDWI、NDVI 公式如式(1)~(3)所示.

$$\text{NDBI} = (d_5 - d_4) / (d_5 + d_4) \quad (1)$$

$$\text{MNDWI} = (d_2 - d_5) / (d_2 + d_5) \quad (2)$$

$$\text{NDVI} = (d_4 - d_3) / (d_4 + d_3) \quad (3)$$

式中 d_i 分别代表 Landsat 卫星影像的第 i 波段像元值 ($i = 2, 3, 4, 5$).

遥感影像中只有当同时满足以下条件的像元才会被分类为城镇建设用地:

NDBI 值 > 0 , MNDWI 值 > -0.37 , NDVI 值 < 0.1 , 且 5 波段像元值 < 100 .

2.2 景观指数的选取

不同的土地利用类型空间格局可能对水质变化产生不同的影响,其景观格局可通过景观指数来衡量^[22]. 本研究选取的景观指数主要包括:斑块个数(NP)、斑块密度(PD)、最大斑块指数(LPI)、景观形状指数(LSI)、连通度指数(COHES). 各景观指数的公式及描述如表 1 所示^[23].

2.3 统计分析方法

研究使用的水质监测数据为 2007 年各小流域的高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TP 浓度,每 2 个月采样一次,数据共 6 期. 对各项水质监测数据进行年平均后,利用统计分析软件 SPSS 进行各水质监测数据与城镇建设用地景观指数之间的相关性分析. 根据水文季节规律将一年 6 期的水质监测数据分为丰水期、平水期和枯水期 3 类,分别对各水文时期的水质监测数据进行平均,然后对不同水文季节的城镇建设用地与水质之间的关系进行研究. 并通过绘制各小流域水质变化的箱形图,对小流域的城镇建设用地和水环境支流状况进行评估.

表 1 景观格局指数描述¹⁾

Table 1 Selected landscape pattern indices in this study

景观指数	公式描述	生态意义
斑块个数 (NP)	$NP = N$	景观异质度
斑块密度 (PD)	$PD = N/A$	景观破碎化程度
最大斑块指数 (LPI)	$LPI = \frac{\max(a_i, \dots, a_n)}{A} \times 100$	景观优势度
景观形状指数 (LSI)	$LSI = \frac{P_i}{\min p_i}$	景观复杂程度
连通度指数 (COHES)	$COHES = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n p_i}{\sum_{i=1}^n p_i \sqrt{a_i}} \right] \times \left[1 - \frac{1}{\sqrt{A}} \right]^{-1} \times 100$	同类像元间的连通程度

1) N 为斑块个数, a_i 为斑块的面积, p_i 为斑块的周长, A 为景观总面积

3 结果与分析

3.1 各小流域城镇建设用地比例与水质

各小流域的城镇建设用地面积百分比与水质指标浓度 (高锰酸盐指数、 NH_4^+-N 、TP) 分别如图 2、3 所示。其中,竹溪、赤溪、温水溪、永丰溪、船场溪、花山溪的流域城镇建设用地面积百分比位于 2% ~ 4% 之间,龙山溪、浙溪的流域城镇建设用地面积百分比位于 4% ~ 5% 之间,小溪、龙门溪、苏溪的流域城镇建设用地面积百分比则高达 9% ~ 16%。从图 3 可以看出,位于九龙江源头的龙门溪、苏溪、小溪的高锰酸盐指数相对较高,西公溪、赤溪、浙溪的高

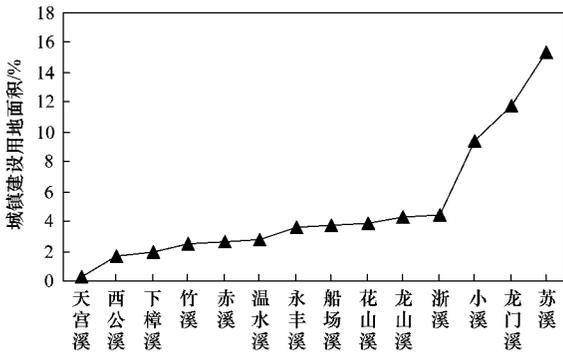


图 2 小流域城镇建设用地面积百分比

Fig. 2 Urban built-up land percent of sub-watersheds

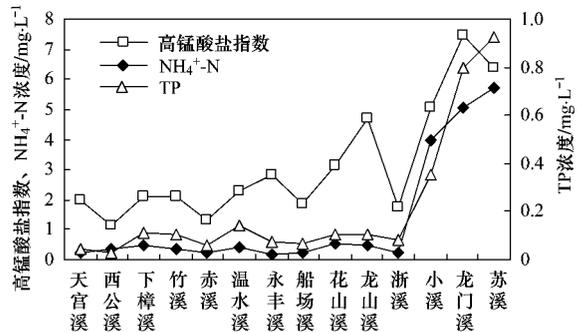


图 3 小流域水质

Fig. 3 Water quality of sub-watersheds

锰酸盐指数相对较低;而苏溪、龙门溪、小溪的 NH_4^+-N 浓度较高,永丰溪、赤溪、浙溪的 NH_4^+-N 浓度较低;苏溪、龙门溪、小溪的 TP 浓度较高,西公溪、天宫溪、赤溪的 TP 浓度较低。总体上,各类水质指标浓度较高的水体主要位于九龙江源头的龙门溪、苏溪和小溪子流域内,与该地区较高的城镇建设用地面积百分比一致。而位于流域中部的赤溪、浙溪、天宫溪等小流域城镇建设用地比例小,水质状况相对较好。

3.2 城镇建设用地景观与水质相关性分析

将城镇建设用地的面积百分比 (% URBAN)、城镇景观格局指数与水质指标进行相关性分析,结果见表 2。

表 2 城镇建设用地景观格局与水质相关性分析结果¹⁾

Table 2 Correlations between urban built-up landscape and water quality in 14 sub-watersheds

指标	参数	% URBAN	NP	PD	LPI	LSI	COHES
高锰酸盐指数	相关系数	0.701 **	0.341	0.315	0.555 *	0.564 *	0.406
	显著性	0.005	0.233	0.273	0.039	0.036	0.15
NH_4^+-N	相关系数	0.695 **	0.045	0.314	0.643 **	0.393	0.406
	显著性	0.006	0.88	0.274	0.002	0.164	0.15
TP	相关系数	0.789 **	0.248	0.456	0.722 **	0.553 *	0.456
	显著性	0.001	0.393	0.101	0.004	0.04	0.101

1) ** 表示在 0.01 水平相关性显著, * 表示在 0.5 水平相关性显著;样本数等于 14

城镇建设用地的面积百分比与高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 具有较强的正相关,相关系数分别为 0.701、0.695、0.789,说明城镇建设用地面积所占小流域面积的百分比与水质指标变化关系密切,对水体中高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 的变化具有较强的指示作用,景观格局指数中最大斑块指数(LPI)与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、高锰酸盐指数、TP 也具有一定的正相关,说明城镇建设用地的空间布局同样影响到水环境的质量. 城镇建设用地的景观优势度越大,对该地区水质恶化造成的影响越明显;景观形状指数(LSI)与高锰酸盐指数、TP 呈正相关,与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 相关性不明显,说明城镇建设用地形状越复杂,该地区水体高锰酸盐指数、TP 浓度越高,对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的浓度则无明显影响;NP、PD、COHES 与各水质指标无明显相关.

3.3 城镇建设用地面积百分比与水质的季节性关联分析

九龙江流域浦南水文站在 2007 年的径流监测量为 $8.52 \times 10^9 \text{ m}^3$,而该站的实测多年平均径流量为 $8.33 \times 10^9 \text{ m}^3$,因此九龙江流域 2007 年可划为平水年. 根据 14 个子流域内各支流径流量的大小将各水质指标按丰水期(7 月、9 月)、平水期(3 月、5 月)、枯水期(1 月、11 月)进行分类,并分别对各水文季节的高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 浓度求平均值. 将 14 组城镇建设用地面积百分比与各水质指标浓度进行季节性关联分析发现(图 4),各小流域的高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 与城镇建设用地面积百分比的线性公式 R^2 均大于 0.6,线性关系显著且方程具有较强的可靠性.

由图 4 可知,各水质指标与城镇建设用地面积百分比的线性公式斜率大小均为丰水期 > 枯水期 > 平水期,说明随着小流域内城镇建设用地面积比例的增多,各水质指标浓度在丰水期增长最快,原因为该时期暴雨径流冲刷给水体带入较多的污染物. 其次增长较快的为枯水期,可能与该时期相对较低的水量导致各水质指标浓度升高有关. 在平水期,城镇建设用地面积与高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 的线性公式斜率相对丰水期、枯水期的斜率较小,水质浓度变化相对不明显. 因此,由城镇建设用地引起的高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 浓度的升高在丰水期和枯水期较为明显,随着各小流域城镇建设用地面积百分比的增长,丰水期和枯水期的水体富营养化需引起重视.

3.4 各小流域城镇建设用地与水质状态评估

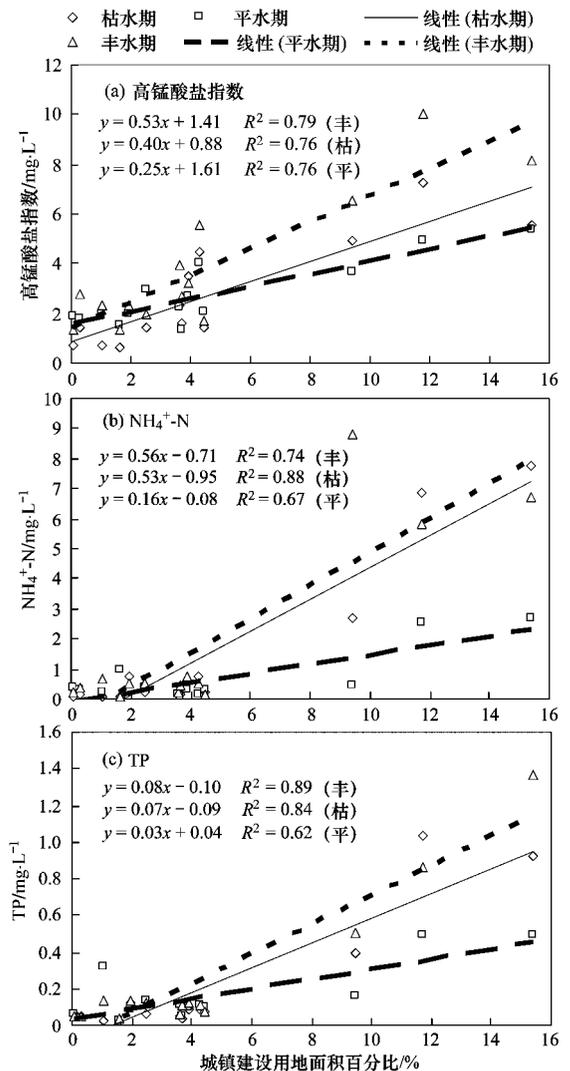


图 4 城镇建设用地与水质的季节性关联分析

Fig. 4 Linear regression between percentage of urban built-up land and water quality in different seasons

Conway^[2]的研究表明,研究区域水体质量对城镇建设用地中不透水地面的面积变化非常敏感,不透水地面百分比超过 2.4% 后即开始对水体质量造成影响,并认为城镇建设用地面积比例与水质之间具有更强的相关性. 流域内城镇建设用地达到一定比例后,造成的流域生态系统功能的丧失是不可逆转的^[24]. 根据流域城镇建设用地面积比例的大小,可将河流水体环境的状态分为胁迫、受影响、退化 3 个发展阶段^[6]. 对小流域城镇建设用地的面积百分比进行排序,并绘制各小流域水质变化的箱形图,可对小流域的城镇建设用地现状和支流水环境状况进行评估(图 5).

从图 5 中可以看出,各小流域城镇建设用地对水质指标的影响初始值位于 5% 左右. 城镇建设用

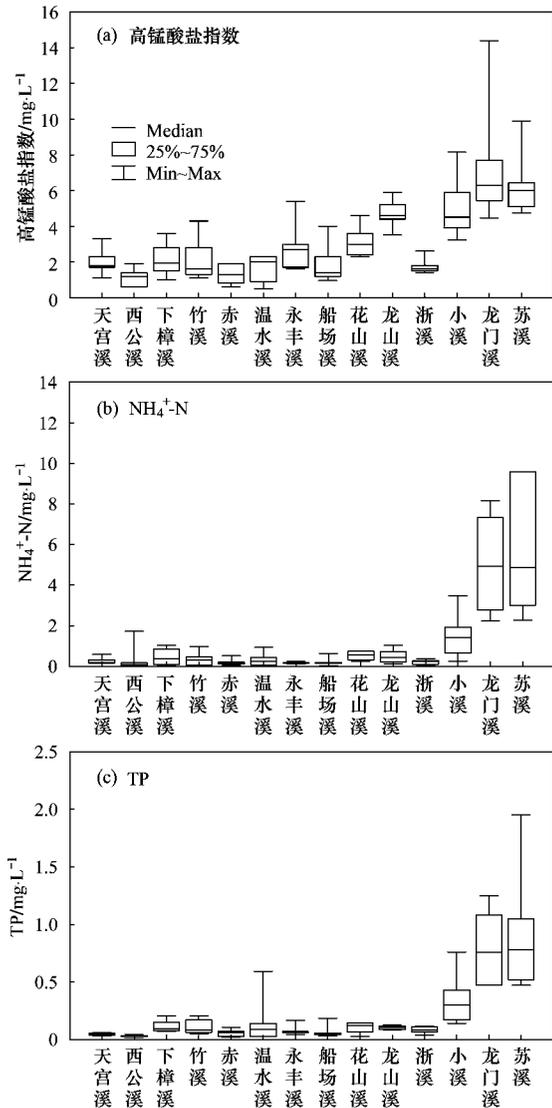


图5 小流域水质指标箱形图

Fig. 5 Box plots of water quality of sub-watersheds

地与水质指标之间初步呈现出增长后的平稳阶段(龙门溪、苏溪),说明城镇建设用对水质指标的影响上限值可能位于12%~15%之间,由于数据的缺乏,这一关系的稳定性无法确认,但是大部分支流水质仍然处于受影响阶段,还未达到退化不可逆转状态.因此,应对城镇建设用地面积百分比比较高的小流域进行城市化进程的调整和控制,从而为该流域城市非点源污染控制和饮用水安全提供保障.

4 讨论

与景观格局指数相比,各小流域内城镇建设用地的面积百分比对水体中高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP的变化具有更强的指示作用,流域内城镇建设用地的面积所占比例越大,流域出水口的水质恶化越明

显.尤其是位于九龙江源头的小溪、龙门溪、苏溪的城镇建设用地的面积比例大,对水质影响突出.城镇建设用地的面积增加就可能引起该地区水质的快速恶化.各小流域水质与城镇建设用地之间处于受影响状态,还未造成水环境退化不可逆转的情况,因此需对该地区的城镇建设用地面积、格局进行控制以防止快速发展的城市化进程加速水环境的恶化.

景观格局指数与高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP也具有一定的正相关,说明城镇建设用地的空间格局对水质变化具有一定的影响,城镇建设用地的优势度越大,水质恶化越明显;城镇建设用地形状越复杂,该地区水体的高锰酸盐指数、TP浓度越高.因此在城镇建设用地规划过程中,应避免城镇用地成片建设,最好以绿色隔离带进行阻隔,且城镇建设形状应尽可能规则.

城镇非点源污染物产生量与径流量关系密切,季节性关联分析发现,城镇建设用地面积比例与各水质指标的回归方程及斜率在丰水期和枯水期最大,说明丰水期和枯水期均是水体营养盐富集的敏感时期,应对该时期的水质污染进行重视和控制.

城镇建设用地对水质影响复杂,不仅受水文季节的影响^[25],而且与居民地、道路等不同城镇建设用地类型有关^[26].今后的研究中还需选取更高分辨率的影像数据和更多时期的水质监测数据,进一步揭示城镇建设用地对水质的影响机制.

5 结论

(1)各流域城镇建设用地的面积百分比与水体中高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP的浓度变化具有较强的相关性,相关系数分别为 $r = 0.701$ 、 $r = 0.695$ 、 $r = 0.789$.

(2)城镇建设用地的最大斑块指数、景观形状指数与各水质指标也具有一定的正相关,说明城镇建设用地对水质的影响不仅与其在流域内的面积比例有关,而且与其空间格局关系密切.

(3)九龙江流域水环境质量的季节变化具有一定的季节规律,随着城镇建设用地面积的增加,水体中高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP浓度的升高速率在丰水期 > 枯水期 > 平水期,因此丰水期和枯水期均是控制河流藻华发生的敏感时期.

参考文献:

- [1] 杨柳, 马克明, 郭青海, 等. 城市化对水体非点源污染的影响[J]. 环境科学, 2004, 25(6): 32-39.
- [2] Conway T. Impervious surface as an indicator of pH and specific

- conductance in the urbanizing coastal zone of New Jersey, USA [J]. *Journal of Environmental Management*, 2007, **85**(2): 308-316.
- [3] Booth D, Jackson C. Urbanization of aquatic systems-Degradation thresholds, stormwater detention and the limits of mitigation [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1997, **22**(5): 1-19.
- [4] 刘伟, 苏睿先, 陈振楼. 上海郊区中心小城镇半城市化特征及其对水环境的影响实例研究[J]. *水土保持研究*, 2008, **15**(6): 252-255.
- [5] 史培军, 袁艺, 陈晋. 深圳市土地利用变化对流域径流的影响[J]. *生态学报*, 2001, **21**(7): 1041-1049.
- [6] Schueler T. The importance of imperviousness [J]. *Watershed Protection Techniques*, 1994, **1**(3): 100-111.
- [7] Paul M, Meyer J. Streams in the urban landscape [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2001, **32**(1): 333-365.
- [8] Morse C, Hurn A, Cronan C. Impervious surface areas as a predictor of the effects of urbanization on stream insect communities in Maine, USA [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2003, **89**(1): 95-127.
- [9] Arnold C, Gibbons C. Impervious surface coverage: the emergence of a key environmental indicator [J]. *Journal of the American Planning Association*, 1996, **62**(2): 243-258.
- [10] 陈利顶, 傅伯杰, 赵文武. “源”“汇”景观理论及其生态学意义[J]. *生态学报*, 2006, **26**(5): 1444-1449.
- [11] 高超, 朱继业, 戴科伟, 等. 快速城市化进程中的太湖水环境保护: 困境与出路[J]. *地理科学*, 2003, **23**(6): 746-750.
- [12] 陈利顶, 傅伯杰, 徐建英, 等. 基于“源-汇”生态过程的景观格局识别方法——景观空间负荷对比指数[J]. *生态学报*, 2003, **23**(11): 2406-2413.
- [13] 黄金良, 李青生, 洪华生, 等. 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*, 2011, **32**(1): 64-72.
- [14] 李兆富, 刘红玉, 李恒鹏, 等. 基于流域单元的营养盐输出与景观异质性影响研究[J]. *环境科学*, 2010, **31**(9): 2029-2035.
- [15] Guo Q, Ma K, Yang L, *et al.* Testing a dynamic complex hypothesis in the analysis of land use impact on lake water quality [J]. *Water Resource Management*, 2010, **24**(7): 1313-1332.
- [16] 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.
- [17] Uuemaa E, Roosaare J, Mander U. Landscape metrics as indicators of river water quality at catchment scale [J]. *Nordic Hydrology*, 2007, **38**(2): 125-138.
- [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 and Urban Planning*, 2007, **80**(4): 345-361.
- [19] Zha Y, Gao J, Ni S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, **24**(3): 583-594.
- [20] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. *遥感学报*, 2005, **9**(5): 589-595.
- [21] 查勇, 倪绍祥, 杨山. 一种利用TM图像自动提取城镇用地信息的有效方法[J]. *遥感学报*, 2003, **7**(1): 37-40.
- [22] Yu X J, Ng C N. Spatial and temporal dynamics of urban sprawl along two urban-rural transects: A case study of Guangzhou, China [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2007, **79**(1): 96-109.
- [23] McGarigal K, Marks B J. FRAGSTAT: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure [R]. General Technique Report PNW-GTR-351. Pacific Northwest Research Station, USDA-Forest Service, Portland, Oregon, USA, 2002.
- [24] Ahearn D, Sheibley R, Dahlgren R, *et al.* Land use and land cover influence on water quality in the last free-flowing river draining the western Sierra Nevada, California [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, **313**(3-4): 234-247.
- [25] 王卫平, 洪华生, 张玉珍, 等. 九龙江污染物入海通量初步估算[J]. *海洋环境科学*, 2006, **25**(2): 45-47.
- [26] 李立青, 朱仁肖, 郭树刚, 等. 基于源区监测的城市地表径流污染空间分异性研究[J]. *环境科学*, 2010, **31**(12): 2896-2904.