

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第2期 Vol.33 No.2 **2013**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 2 期

2013 年 1 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 岩溶山区水分时空异质性及植物适应机理研究进展..... 陈洪松, 聂云鹏, 王克林 (317)
- 红树林植被对大型底栖动物群落的影响 陈光程, 余 丹, 叶 勇, 等 (327)
- 淡水湖泊生态系统中砷的赋存与转化行为研究进展..... 张 楠, 韦朝阳, 杨林生 (337)
- 纳米二次离子质谱技术(NanoSIMS)在微生物生态学研究中的应用 胡行伟, 张丽梅, 贺纪正 (348)
- 城市系统碳循环: 特征、机理与理论框架 赵荣钦, 黄贤金 (358)
- 城市温室气体排放清单编制研究进展..... 李 晴, 唐立娜, 石龙宇 (367)

个体与基础生态

- 科尔沁沙地家榆林的种子散布及幼苗更新..... 杨允菲, 白云鹏, 李建东 (374)
- 环境因子对木棉种子萌发的影响 郑艳玲, 马焕成, Scheller Robert, 等 (382)
- 五花米草与短叶荳蔻落物分解过程中碳氮磷化学计量学特征 欧阳林梅, 王 纯, 王维奇, 等 (389)
- 性别、季节和体型大小对吐鲁番沙虎巢域的影响 李文蓉, 宋玉成, 时 磊 (395)
- 遮蔽行为对海刺猬摄食、生长和性腺性状的影响..... 罗世滨, 常亚青, 赵 冲, 等 (402)
- 水稻和玉米苗上饲养的稻纵卷叶螟对温度的反应 廖怀建, 黄建荣, 方源松, 等 (409)

种群、群落和生态系统

- 亚热带不同林分土壤表层有机碳组成及其稳定性 商素云, 姜培坤, 宋照亮, 等 (416)
- 禁牧条件下不同类型草地群落结构特征 张鹏莉 陈 俊 崔树娟, 等 (425)
- 高寒退化草地狼毒与赖草种群空间格局及竞争关系 任 珩, 赵成章 (435)
- 小兴安岭 4 种典型阔叶红松林土壤有机碳分解特性 宋 媛, 赵溪竹, 毛子军, 等 (443)
- 新疆富蕴地震断裂带植被恢复对土壤古菌群落的影响 林 青, 曾 军, 张 涛, 等 (454)
- 长期施肥对紫色土农田土壤动物群落的影响 朱新玉, 董志新, 况福虹, 等 (464)
- 潮虫消耗木本植物凋落物的可选择性试验 刘 燕, 廖允成 (475)
- 象山港网箱养殖对近海沉积物细菌群落的影响 裘琼芬, 张德民, 叶仙森, 等 (483)
- 2005 年夏季东太平洋中国多金属结核区小型底栖生物研究 王小谷, 周亚东, 张东声, 等 (492)
- 川西亚高山典型森林生态系统截留水文效应 孙向阳, 王根绪, 吴 勇, 等 (501)

景观、区域和全球生态

- 中国水稻生产对历史气候变化的敏感性和脆弱性 熊 伟, 杨 婕, 吴文斌, 等 (509)
- 1961—2005 年东北地区气温和降水变化趋势 贺 伟, 布仁仓, 熊在平, 等 (519)
- 地表太阳辐射减弱和臭氧浓度增加对冬小麦生长和产量的影响 郑有飞, 胡会芳, 吴荣军, 等 (532)

资源与产业生态

- 基于环境卫星数据的黄河湿地植被生物量反演研究 高明亮, 赵文吉, 官兆宁, 等 (542)
- 黄土高原南麓县域耕地土壤速效养分时空变异 陈 涛, 常庆瑞, 刘 京, 等 (554)

不同水稻栽培模式下小麦秸秆腐解特征及对土壤生物学特性和养分状况的影响..... 武 际,郭熙盛,鲁剑巍,等 (565)

施氮时期对高产夏玉米光合特性的影响 吕 鹏,张吉旺,刘 伟,等 (576)

城乡与社会生态

城市景观组分影响水质退化的阈值研究 刘珍环,李正国,杨 鹏,等 (586)

长株潭地区生态可持续性 戴亚南,贺新光 (595)

外源 NO 对镉胁迫下水稻幼苗抗氧化系统和微量元素积累的影响 朱涵毅,陈益军,劳佳丽,等 (603)

达里诺尔湖沉积物中无机碳的形态组成 孙园园,何 江,吕昌伟,等 (610)

绿洲土 Cd、Pb、Zn、Ni 复合污染下重金属的形态特征和生物有效性 武文飞,南忠仁,王胜利,等 (619)

柠檬酸和 EDTA 对铜污染土壤环境中吊兰生长的影响 汪楠楠,胡 珊,吴 丹,等 (631)

研究简报

海州湾生态系统服务价值评估 张秀英,钟太洋,黄贤金,等 (640)

内蒙古羊草群落、功能群、物种变化及其与气候的关系 谭丽萍,周广胜 (650)

氮磷供给比例对长白落叶松苗木磷素吸收和利用效率的影响 魏红旭,徐程扬,马履一,等 (659)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 352 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 38 * 2013-01



封面图说: 科尔沁沙地榆树——榆树疏林草原属温带典型草原地带,适应半干旱半湿润气候的隐域性沙地顶级植物群落,具有极强的适应性、稳定性,生物产量较高。在我国仅见于科尔沁沙地和浑善达克沙地。是防风固沙、保护沙区生态环境和周边土地资源的一种重要的植物群落类型,是耐旱沙生植物的重要物种基因库和荒漠野生动物的重要避难所和栖息地。这些年来,由于人类毁林开荒、过度放牧、甚至片面地建立人工林群落等的干扰,不同程度地破坏了榆树疏林的生态环境,影响了其特有的生态作用。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201111151740

刘珍环, 李正国, 杨鹏, 王仰麟. 城市景观组分影响水质退化的阈值研究. 生态学报, 2013, 33(2): 0586-0594.

Liu Z H, Li Z G, Yang P, Wang Y L. The degradation threshold of water quality associated with urban landscape component. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 0586-0594.

城市景观组分影响水质退化的阈值研究

刘珍环^{1,2}, 李正国^{1,2}, 杨 鹏^{1,2,*}, 王仰麟³

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 农业部农业信息技术重点实验室, 北京 100081;

3. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871)

摘要:运用景观格局与水质监测方法评价城市景观变化对河流水质的影响,是当前景观格局-效应研究的热点问题。为实现城市发展目标与环境保护目标的统一,需要科学判断城市景观变化对水质的影响程度与范围,特别是以城市不透水表面为代表的景观组分变化,是目前水质退化研究中的核心对象,而对水质退化的景观阈值研究目前尚存争论。基于截面数据进行统计分析,构建阈值判定方法,选择深圳市为案例研究区,研究快速城市化地区的河流水质退化的景观阈值水平。结果表明,在深圳市,河流缓冲区宽度为 100—200 m 时,景观变化对水质显著性影响最高($P < 0.001$)。缓冲区内,景观变化与耗氧、营养盐等类指标呈指数关系,具有显著性,是这类指标变化的最主要影响因素;同时,景观变化与有毒物质及重金属等类指标呈指数关系,具有显著性,但并非这类指标变化的最主要因素。影响水质退化的不透水表面比例阈值水平介于 38.2%—50% 之间,最小阈值水平为 38.2%,即当流域缓冲区内不透水表面百分比超过 38.2% 时,河流水质显著退化。

关键词:不透水表面百分比; 水质; 景观阈值; 城市流域

The degradation threshold of water quality associated with urban landscape component

LIU Zhenhuan^{1,2}, LI Zhengguo^{1,2}, YANG Peng^{1,2,*}, WANG Yanglin³

1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

2 Key Laboratory of Agri-informatics, Ministry of Agriculture, China, Beijing 100081, China

3 College of Urban and Environmental Science, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: It is one of the key topics in landscape pattern and ecological process analysis to combine landscape pattern analysis and water quality monitoring, so as to assess the impact of urban landscape change on water quality. Moreover, to realize the harmonization between urban development and water quality protection, it is in great need for the quantitative analysis of the relationship between urban landscape change and water quality degradation. Unfortunately, there is no enough scientifically understanding on the very relationship so far. One of the solutions is to quantify the degradation threshold of urban landscape change impact on water quality. In this research, nonlinear regression was used to analyze the relationship between urban landscape change and water quality degradation, and a new method was developed to estimate the threshold based on cross-section statistics. Impervious Surface Area (ISA) was conducted to monitor the urbanization degree in the watershed, and chemical indicators were used to analyze the water quality. All of 31 sample sites and watersheds were selected in Shenzhen. Watershed and buffer zone scale of urban landscape change was quantified with the application of Linear Spectral Mixture Method using Landsat TM images, and water quality was monitored 12 times a year using 15 water quality indicators. Both were collected in 2005. The results indicated that, when stream buffer zone was set

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41101170,40635028)

收稿日期:2011-11-15; 修订日期:2012-05-31

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangpeng@mail.caas.net.cn

at 100—200m, there was the highest significance of the impact of urban landscape change on water quality, with the P value less than 0.001. Furthermore, the exponential relationships between such water quality indicators as DO, S^{2-} , CGB and F^{-} and urban landscape change were significant when the flow path distance was accepted, with the significantly exponential relationships for COD_{Mn} , BOD_5 , NH_3-N , TP, TN, Zn, Pb, VP, Oils, ANC and SO_4^{2-} in Euclidean distance. The exponential relationships between oxygen consumption, eutrophication of water quality and impervious component indicated that urban landscape change was the most important influencing factor, which interpreted about 50–60% of water quality degradation. However, for other water quality indicators, such as heavy metals and toxicity, their changes could only be interpreted by urban landscape change for 30%—40%, which meant urban landscape change was no longer a significant influencing factor compared with other factors such as point source pollution input to stream ecosystem. These results agreed with that urbanization degree of riparian was of great significance to chemical water quality of stream. Furthermore, with the exception of Zn, F^{-} , Pb and Oils, the degradation threshold level of water quality associated with landscape change was between 38.2% and 50%. The minimum value of 38.2% meant if the ratio of watershed imperviousness area reached this level, water quality degradation would began and the water quality would be prone to be hardly recovered. The results showed that if the target of watershed management was set as to control stream water quality, it is in great need to scientifically plan the impervious surface area in stream buffer zone.

Key Words: imperviousness surface area; water quality; landscape threshold for water quality; urban watershed

景观是流域地表的综合体,也是各种功能流的主要载体,直接影响流域生态系统的各项要素^[1]。规划和管理流域生态系统,调控人类活动对河流生态系统的影响是当前研究的热点问题之一^[2]。流域城市化对河流生态系统有显著影响^[3],其中城市景观变化与河流水质的关系是城市发展与水环境保护之间矛盾的焦点,解决这类矛盾问题的方法之一是科学判断城市景观变化对水质的影响程度和范围^[4]。水质退化的景观阈值又是流域管理与城市规划科学制定的重要指标之一,因此水质退化是否存在景观阈值是解决该目标的关键点^[5]。

相关研究表明,较低程度的景观变化就可能导致水质退化,而大规模的景观变化更是使得水质退化到水生生物群落受损,无法恢复^[6]。河流水质受到流域景观变化的影响,其中流域中的城市、农田、经营林地、牧场等人工管理的景观变化对水质影响尤为显著^[7]。流域的景观格局变化驱动非点源污染排放,然而景观格局指数难以在流域尺度有效表达景观格局与水质之间的关系^[8]。时空分布的不透水表面指数(ISA)能够有效刻画此类景观变化,既可表征流域的城市化程度,又可评价流域环境质量,受到景观生态、城市规划、流域管理、环境科学等学科研究者的重视^[9]。城市地区,不透水表面扩张是造成河流非点源污染的重要影响因素,这种扩张阻碍水文循环,隔离下渗,进而阻碍土壤对自然污染物的降解。暴雨径流冲刷不透水面上积累的污染物进入水体、河流造成水质污染^[10],因此探求导致水质退化的不透水表面扩张阈值成为当前城市水环境管理和城市规划的研究目标。

阈值是当系统质量、性能或征候发生突变时的突变点值^[11],景观变化影响水质退化是否存在阈值,且阈值范围广受争议,其难点在于如何有效地判定阈值^[12]。已有报道认为不透水表面扩张显著影响水质,且水质化学指标的阈值水平介于10%—50%之间,但阈值范围宽且尚无较好的判定方法^[13-14]。本研究基于截面数据,建立一种基于观测数据和经验统计模型的阈值判定方法,称之为拐点阈值,该阈值的定义为水质退化到不可逆转时流域不透水表面百分比。为判定阈值的有效性,用《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)中三类、五类水质对应的流域不透水表面百分比作为阈值的检验值,同时三、五类水质阈值也可作为河流水质功能类型的阈值标准。科学判定阈值,以期阈值水平成为限制不透水表面扩展的负效应的定量依据以及制定流域管理措施与城市规划中合理发展城市化的重要标准。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

深圳市位于珠江三角洲的东南部,珠江口伶仃洋以东。根据 2005 年土地变更调查数据,深圳市土地总面积 1952.84 km²(不包括内伶仃岛),是一个滨海城市,共有大小河流 310 余条,其中流域面积大于 10 km² 的有 69 条,流域面积大于 100 km² 的有 5 条,即深圳河、茅洲河、龙岗河、观澜河和坪山河。境内的河流主要以海岸山脉和羊台山为主要分水岭,分成南、西、北 3 个水系。南部诸河注入深圳湾、大鹏湾、大亚湾,称为海湾水系;西部诸河注入珠江口伶仃洋,称珠江口水系;北部诸河注入东江的一、二级支流,称东江水系。用 GIS 技术水环境监测点提取对应的流域范围,水系独立,大多数监测点间无水力联系(图 1)。

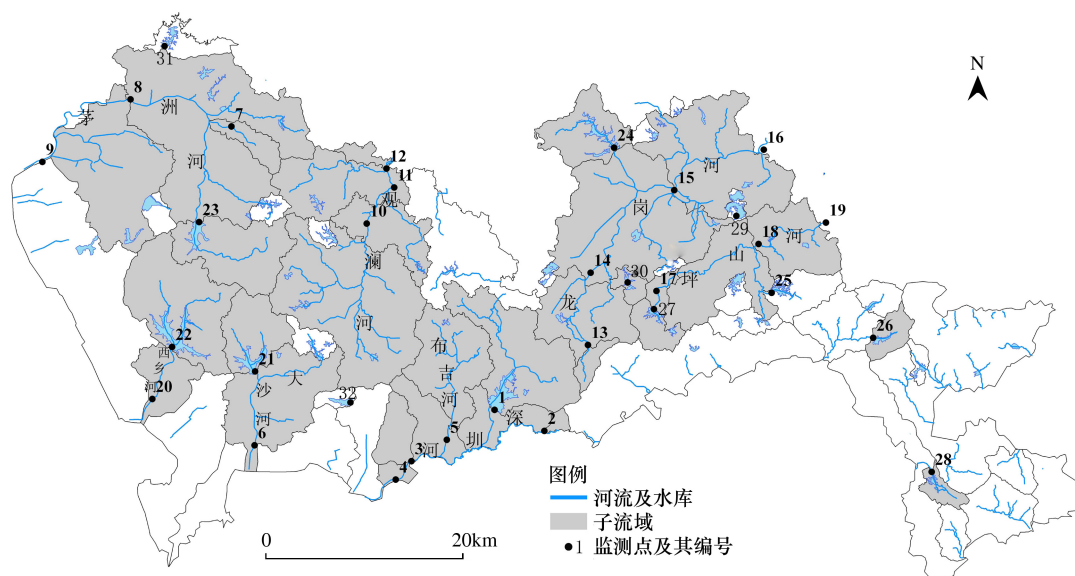


图 1 研究区示意图

Fig. 1 Study area and watersheds in Shenzhen

1.2 数据源

(1) 水质指标。深圳市 2005 年水环境质量公报提供了监测点及水环境指标的监测数据,收集 31 个子流域的年均水质监测数据,选取 15 项水环境指标为研究对象,即溶解氧(DO)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、生化需氧量(BOD₅)、氨氮(NH₃-N)、总磷(TP)、总氮(TN)、锌(Zn)、氟化物(F⁻)、铅(Pb)、阴离子表面活性剂(ANC)、硫酸盐(SO₄²⁻)、挥发酚(VP)、石油类(Oils)、大肠菌群(CGB)、硫化物(S²⁻)。除大肠菌群的单位为个/L 外,其它水质指标单位为 mg/L。水质监测频率为每月 1 次,全年枯、丰水期各 6 次。

(2) 不透水表面百分比数据。基于 2005 年的 Landsat TM 卫星影像,建立不透水表面混合像元分解模型,运用线性光谱分离技术提取了不透水表面百分比的空间分布。相关遥感反演结果及检验参见文献^[15]。

2 研究方法

2.1 指数方程拟合

为比较不同缓冲区内的不透水表面变化对水质的影响,采用指数模型进行拟合,对比其拟合优度(R^2)及显著性检验(P 值),以比较其显著性^[16]。指数拟合模型如下:

$$Y = Ae^{Bx} \quad (1)$$

式中, Y 为因变量,本研究中用水质化学指标表征; x 为自变量,本研究中用不透水表面百分比表征; A 、 B 是方程的系数。

2.2 阈值判定方法

医学病例统计、曲线回归拟合的拐点判断中常用一种基于未知拐点的回归方法来判断两组具有显著性关

系的观测数据之间的阈值^[17]。本研究将这种建立因变量与自变量之间的阈值判断方法,引入流域景观指数与水质指标关系确定后的阈值判定,其基本原理如下:

(1)任何两组观测数据之间只要存在单调非线性或者曲线变化时,可以将数据转化为较为类似的线性方程组合模型,或者分段线性函数,关系式如下:

$$g(E[Y]) = \eta(X) + \beta \times h(z; \psi) \quad (2)$$

式中, $g(E[Y])$ 表示某个函数 $E[Y]$ 的线性回归模型的表达式, $\eta(X)$ 表示线性回归方程的线性参数, $h(z; \psi)$ 表示某个包含 Z 、 ψ 的函数表达式, $E[Y]$ 为任何 X 的函数表达式,其中 $X = h(z; \psi)$; Z 为 X 函数的自变量、 ψ 为 Z 在具体点的具体值,在本项中特指变化拐点值 $\psi \in R$ 。

(2)对于任何 $h(z; \psi)$ 在任何一个 $\psi^{(0)}$ 的拐点处,都可以对 $h(z; \psi)$ 进行一阶泰勒展开式进行降阶,有如下公式:

$$h(z; \psi) \approx h(z; \psi^{(0)}) + (\psi - \psi^{(0)})h'(z; \psi^{(0)}) \quad (3)$$

式中, $h'(z; \psi^{(0)})$ 是 $h(z; \psi^{(0)})$ 在 $\psi^{(0)}$ 的一阶导数。

(3)将一阶导数代入式(1)中,对于函数就有:

$$\begin{aligned} g(E[Y]) &= \eta(X) + \beta \times h(z; \psi) = \eta(X) + \beta \times h(z; \psi^{(0)}) + \beta \times (\psi - \psi^{(0)})h'(z; \psi^{(0)}) \\ &= \eta(X) + \beta \times h(z; \psi^{(0)}) + \gamma \times h'(z; \psi^{(0)}) \end{aligned}$$

式中, $\gamma = \beta \times (\psi - \psi^{(0)})$, 因此上式可以认为是所有的因变量都依赖于自变量 $\psi^{(0)}$ 。因此可以应用最大似然估计方法根据观测值来估计上述参数值,并进行收敛估计,计算式如下:

$$\hat{\psi} = \frac{\gamma}{\beta} + \psi^{(0)} \quad (4)$$

因此,只需要首先假定任意一个观测值作为 $\psi^{(0)}$ 作为初始估计值,然后运用非线性估值计算模型来进行重复计算,最后获得模型参数收敛。当 $\hat{\psi} - \psi^{(0)} \approx 0$ 时,模型收敛,这样获得了适合方程的所有参数。其标准差检验公式如下:

$$SE(\hat{\psi}) = \{ [\text{avr}(\hat{\gamma}) + \text{var}(\beta)(\hat{\gamma}/\beta)^2 + 2(\hat{\gamma}/\beta)\text{cov}(\hat{\gamma}, \beta)] / \beta^2 \}^{1/2} \quad (5)$$

式中, $\text{var}()$ 表示方差, $\text{cov}()$ 表示协方差。

(4)上述计算推导过程指的是一般性未知点阈值的推导原理,函数可以用两段式的函数进行拟合,有如下推导过程,对于任意变量 Z 有如下的拟合曲线方程:

$$\alpha Z + \beta(Z - \psi)_+ \quad (6)$$

式中, ψ 为阈值拐点,而 $(Z - \psi)_+$ 在 $I(A) = 1$ 为真时, $(Z - \psi)_+ = (Z - \psi) \times I(Z > \psi)$, α 是左半段直线函数的斜率($Z \leq \psi$), β 是斜率差参数, $\alpha + \beta$ 是右半段直线函数的斜率;因此只要存在阈值拐点,就有 $|\beta| > 0$ 。因此可以假设 $\psi^{(0)}$ 为阈值拐点时,其相应的一阶泰勒展开式如下:

$$(Z - \psi)_+ = (Z - \psi^{(0)})_+ + (\psi - \psi^{(0)})(-1)I(Z > \psi^{(0)}) \quad (7)$$

式中, $(-1)I(Z > \psi^{(0)})$ 为 $(Z - \psi)_+$ 在 $\psi^{(0)}$ 的一阶泰勒展开式。

在上述展开式后,需要对参数进行估计,因此可以先做任意一点 S 为阈值拐点,上述展开式的常数项可以用如下公式表达:

$$U^{(s)} = (Z - \psi^{(s)})_+ \text{ 及 } V^{(s)} = -I(Z > \psi^{(s)}) \quad (8)$$

这样具体的模型拟合函数就可以变化为:

$$Y = \alpha Z + \beta U^{(s)} + \gamma V^{(s)} \quad (9)$$

在本研究中 Y 为水质指标, Z 表示自变量为流域内不透水表面百分比,其中参数满足 $\psi - \psi^{(s)} = \frac{\gamma}{\beta}$ 。

在 Matlab 软件中运用非线性曲线估值进行曲线拟合,并进行参数循环拟合,在参数获得最小差值,拟合的收敛性最好,且方程趋于拟合效果最好时,就认为该值是阈值拐点,即流域或缓冲区不透水表面比例达到阈

值时,水质显著退化且不采取治理措施将难以逆转。

3 结果分析

3.1 流域缓冲区的景观与水质关系

河流缓冲区的宽度直接决定了其影响程度,因此将河流缓冲区的宽度按不等距宽度设计,构建了两种常用于河流缓冲区形式,径流距离形式^[18]和欧氏距离形式^[19]。将河流缓冲分为0—100 m、101—200 m、201—500 m、501—750 m、751—1000 m、1001—1500 m,子流域,共计7个等级,径流距离的宽度上增加1501—2400 m等级,总计14个等级。基于2005年不透水表面百分比与流域年均值水质指标的截面数据,经指数模型拟合选择拟合系数(R^2)最大且通过 P 值检验($P < 0.001$)的指数方程(图2,表1)。分析表明,多数水质指标的受到100 m以内缓冲区的不透水表面百分比的显著性影响,其中径流距离对DO、 S^{2-} 、CGB的指数关系最佳,而欧氏距离对 COD_{Mn} 、 BOD_5 、 NH_3-N 、TP、TN、Zn、Pb、VP、Oils、ANC、 SO_4^{2-} 等11个水质指标有最佳的指数关系,而只有 F^- 的径流距离影响为200 m(表1)。在深圳,有两个重要因素影响流域景观格局与水质的关系,其一深圳地处亚热带且是滨海城市,区域内河网密度高达 0.69 km/km^2 ^[20],河网密度决定了降雨径流能携带污染物迅速进入河道;其二河流流经大部分城市区域,大量不透水建筑物临河而建,因此河流100 m缓冲区内不透水表面比例较高。

SO_4^{2-} 、CGB、ANC、 BOD_5 、TP、TN的 R^2 系数达到0.6以上,水质与景观变化有显著的指数关系,是因为多数河岸周边的不透水表面的比例介于50%—70%,河流缓冲区的保护水质功能丧失,污染物可以直接进入河道,富集在景观表层的耗氧、阴离子及富营养化类污染也可以随降雨、人工冲刷等方式影响水质。DO、 COD_{Mn} 、 NH_3-N 、 F^- 、VP、Oils、 S^{2-} 等7个指标的拟合系数 R^2 在0.5—0.6之间,指数关系具有显著性,河流缓冲区内不透水表面比例变化是决定水质变化的主要因素,但同样其他非景观因素对水质也有较大影响。 R^2 指出Pb、Zn两个重金属指标与不透水表面百分比的拟合效果差,只能分别解释34.7%和42%的水质变化,说明在深圳市重金属及有毒物质受到不透水表面景观变化的影响要小于其它非景观因素。由此可见,河流缓冲区内景观变化对河流水质中耗氧、营养盐等类指标有显著性的指数关系,是河流水质退化的最主要影响因素,而对有毒物质及重金属等类指标虽有显著性的指数关系,虽是河流水质退化的影响因素,但可能非最主要因素。

3.2 水质退化的景观阈值

运用阈值方法得到河流缓冲区尺度阈值(表1)。15个水质指标的阈值有以下几种类型。(1)耗氧类指标:DO的不透水表面百分比阈值为38.6%,介于三类水质与五类水质之间。 COD_{Mn} 的不透水表面百分比阈值为41%,低于三类水质。 BOD_5 的不透水表面百分比阈值50%,高于五类水质。耗氧类指标的阈值水平表明流域不透水表面扩展显著增加了水质的耗氧物质,降低了水中的溶解氧;阈值水平差别大表明DO的变化响应不透水表面阈值水平最低,而 COD_{Mn} 次之,再次为 BOD_5 。(2)富营养化类指标: NH_3-N 的不透水表面百分比阈值介于三类与五类水的40%—45%之间。TP的阈值高于 NH_3-N ,但低于TN,表明富营养化类水质指标容易受到不透水表面变化的影响,且非常敏感,小幅度变化就可能导致水质超过水质标准。(3)痕量有机物类指标:VP、Oils及ANC代表了痕量有机物类水质指标的阈值,VP的不透水表面百分比阈值为42.6%,ANC为48.2%。(4)主要离子类指标: SO_4^{2-} 及 S^{2-} 的阈值都显著低于三类水质,分别为38.2%及41.5%。(5)重金属及有毒物质指标:Zn、Pb及 F^- 水质指标的没有得到阈值。(6)微生物指标:CGB的三类水质值为35.8%,五类水质值为39.9%,阈值为46.1%,阈值显著高于五类水质标准。其中低于三类水质对应的不透水表面百分比的水质指标有 COD_{Mn} 、VP、 S^{2-} 和 SO_4^{2-} ;介于三类与五类水质的水质指标有DO、TP、 NH_3-N 和CGB;高于五类水质的水质指标有 BOD_5 、TN和ANC。

水质受缓冲区内不透水表面变化的影响阈值与水化学指标类型有显著关系,易受不透水表面扩张影响的水质指标类明显具有较低阈值水平。主要离子类指标中 SO_4^{2-} 的 R^2 达0.768,而其阈值水平也是最低的38.2%;CGB、TP、TN及ANC的 R^2 介于0.6—0.69,而它们的阈值水平也集中于39.9%—48.2%; S^{2-} 、

表 1 缓冲区尺度水质退化的不透水表面百分比阈值及指数关系

指标类型 Indicator type	水质指标 Water quality indicator	缓冲区类型 及距离 Buffer zone type and distance /m	拟合方程 Fitted formula	R^2	P	三类水质标准 Standard of water quality type three / (mg/L; 个/L)	五类水质标准 Standard of water quality type five / (mg/L; 个/L)	三类水质参考值 Imperviousness percent of water quality type five /%	五类水质参考值 Imperviousness percent of water quality type five /%	阈值 Imperviousness percent threshold value /%
耗氧指标 Oxygen	DO	径流, 100	$Y=30.163e^{-5.107x}$	0.538	0.001	5	2	35.2	53.1	38.6
富营养化指标 Eutrophication	COD _{Mn}	欧氏, 100	$Y=0.406e^{6.229x}$	0.553	0.001	6	15	43.2	57.9	41.0
	BOD ₅	欧氏, 100	$Y=0.132e^{9.678x}$	0.603	0.001	4	10	35.2	44.7	50.0
	NH ₃ -N	欧氏, 100	$Y=0.003e^{14.44x}$	0.576	0.001	1	2	40.2	45.0	43.4
	TP	欧氏, 100	$Y=0.001e^{14.144x}$	0.601	0.001	0.2	0.4	37.5	42.4	39.9
痕量有机指标 Trace organic	TN	欧氏, 100	$Y=0.064e^{9.870x}$	0.6	0.001	1	2	27.9	34.9	45.6
	Oils	欧氏, 100	$Y=0.001e^{12.279x}$	0.553	0.001	0.05	1	31.9	56.3	-
	ANC	欧氏, 100	$Y=0.001e^{12.266x}$	0.606	0.001	0.2	0.3	43.2	46.5	48.2
	VP	欧氏, 100	$Y=0.0002e^{7.301x}$	0.524	0.001	0.005	0.1	44.1	-	42.6
主要离子类指标 Anions	S ²⁻	径流, 100	$Y=0.001e^{9.289x}$	0.522	0.001	0.2	1	57.2	74.6	41.5
	SO ₄ ²⁻	欧氏, 100	$Y=0.368e^{9.372x}$	0.766	0.001	250	-	69.6	-	38.2
	Zn	欧氏, 100	$Y=0.001e^{8.6x}$	0.42	0.001	1	2	-	-	-
	Pb	欧氏, 100	$Y=0.0003e^{4.946x}$	0.347	0.001	0.05	0.2	-	-	-
Heavy metals and toxic substances	F ⁻	径流 200	$Y=0.034e^{5.739x}$	0.5548	0.001	1	1.5	58.9	66.0	-
微生物指标 Microbial	CGB	径流, 100	$Y=0.057e^{33.765x}$	0.689	0.001	10000	40000	35.8	39.9	46.1
最低阈值标准 Min threshold value										38.2

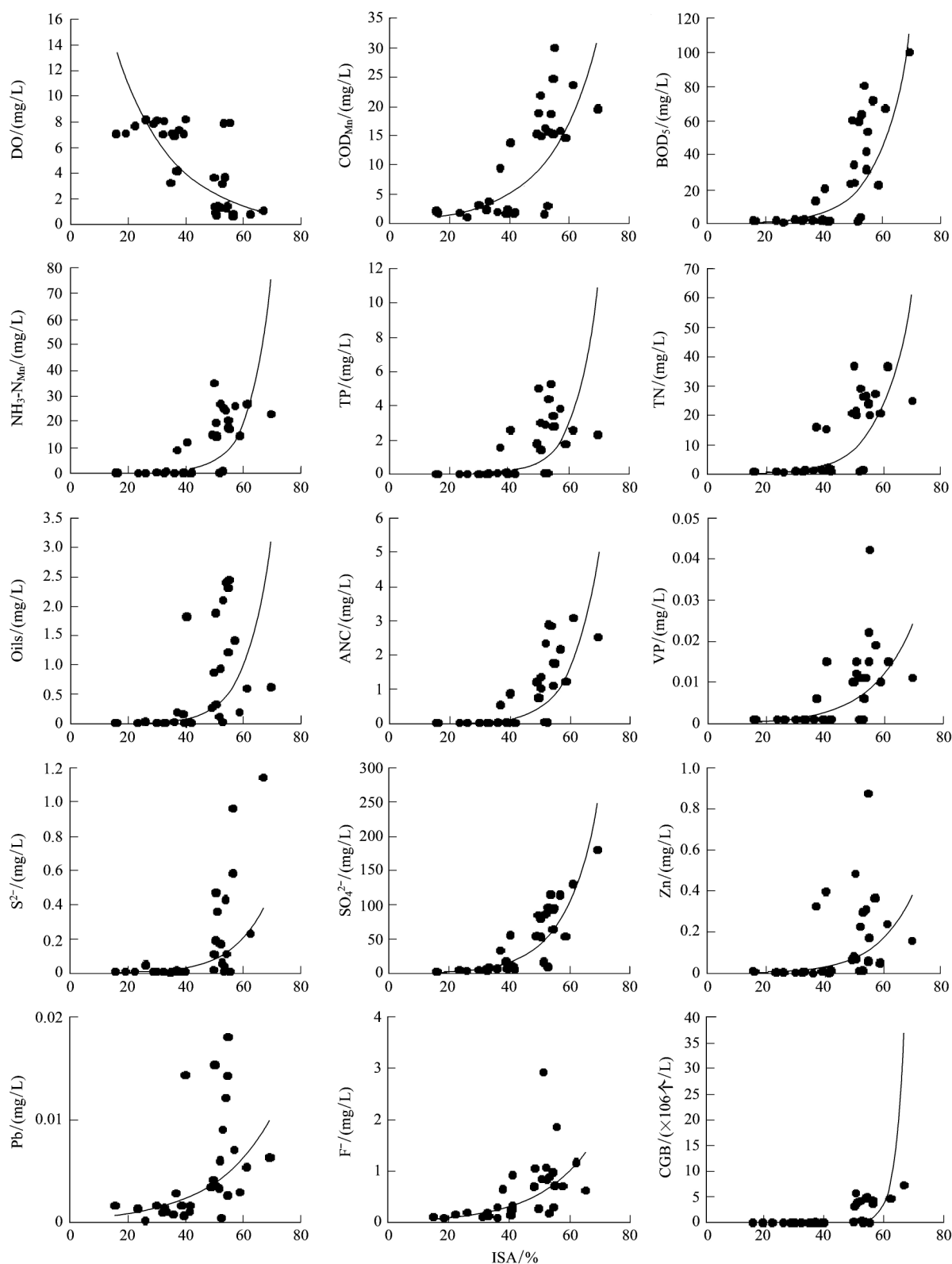


图2 最优缓冲区内不透水表面百分比与水质指标的指数关系

Fig. 2 The Exponential relationship between water quality and percent of ISA at buffer zone scale

VP、DO、 COD_{Mn} 及 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的 R^2 介于 0.52—0.58, 阈值水平又低于前两面类, 集中于 41%—43.4%。 BOD_5 的 R^2 为 0.603, 但其阈值却为最高的 50%。从河流缓冲区尺度水质指标的城市景观组分阈值判定结果可看出,

深圳地区的水质指标在响应缓冲区内不透水表面变化有显著差异,其阈值范围介于 38.2%—50%。最低阈值标准为 38.2%,也即是说当河流缓冲区内不透水表面比例超过 38.2%时,河流水质退化到难以恢复的程度。在今后的流域管理中,特别需要控制缓冲区内不透水表面扩张对富营养化、耗氧类、主要离子类和微生物这四类指标的影响。

4 结论与讨论

研究基于截面数据,建立水质指标与缓冲区内城市景观组分之间的指数关系;并引入统计学中拐点阈值判定方法,建立水质受景观组分变化影响的阈值判定方法,获得拐点阈值表示水质退化到不可逆转时流域不透水表面百分比,主要结论如下:

(1)指数拟合表明 14 个水质指标受 100 m 缓冲区内不透水表面百分比显著性影响,其中径流距离缓冲区内 DO 、 S^{2-} 、 CGB 与不透水表面百分比的指数关系最优,欧氏距离缓冲区内 COD_{Mn} 、 BOD_5 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 TP 、 TN 、 Zn 、 Pb 、 VP 、 Oils 、 ANC 、 SO_4 等 11 个水质指标有最佳的指数关系;而 200m 径流距离缓冲区内不透水表面百分比变化则对 F^- 影响最为显著。景观组分变化与河流水质中耗氧、营养盐等类指标有显著性的指数关系,是河流水质退化的主要影响因素;有毒物质及重金属等类指标虽受缓冲区内景观组分的影响,但不是最主要因素。

(2)景观组分阈值判定表明不同水质指标之间的景观组分阈值差异约为 10%,其范围介于 38.2%—50%,最小阈值水平为 SO_4^{2-} 的 38.2%,即当河流缓冲区内不透水表面比例超过 38.2%时,河流水质退化到难以恢复的程度。

景观组分影响河流水质退化阈值研究尚有如下问题值得深入讨论:

(1)阈值的可靠性检验。虽然研究采用统计学方法获得了水质指标响应不透水表面变化的阈值,但没有方法检验阈值的可靠性,当前只能依据文献报道和水质标准阈值进行比较分析。与已有的文献报道比较^[13],本研究结果与其它地区较为接近,但需指出的是文献报道的阈值包含多种,有初始影响阈值^[21]、退化阈值^[22]等类型,而本研究则指的是退化阈值。然而,推广阈值标准使用,还需更多研究区、更多案例和实测比较。

(2)阈值适用范围及应用前景。以往判定景观影响水质退化的阈值,只从观测数据间人为观测的突变点。而本研究基于统计学方法,采用收敛逼近的方式获得景观组分阈值,受到两者关系的密切程度影响,即不透水表面百分比与水质关系拟合好,阈值易获得;反之则难获得。

(3)案例区的代表性。选择深圳市作为案例研究区的原因中有两点非常重要,其一河流监测点间的水力联系度低,属于不同子流域,监测点间相互干扰少;其二流域面积小、景观变化程度不一,但流域的自然地理和环境条件类似。然而大流域是否有阈值现象,不同城市是否有同等的阈值,还有待深入研究。尽管城市景观影响水质退化的阈值研究尚有待深入,但本研究提出的统计学方法取得较好的效果。阈值结果可为城市规划和流域管理等领域提供限制不透水表面扩展的水质负效应的定量依据。

References:

- [1] Fu B J, Zhao W W, Chen L D, Liu Z F, Lü Y H. Eco-hydrological effects of landscape pattern change. *Landscape and Ecological Engineering*, 2005, 1(1): 25-32.
- [2] Liu Y, Guo H C, Huang K, Yu Y J, Dai Y L, Mao G Z. The theories and methods of lake-watershed ecosystem management (LWEM). *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12): 5352-5360.
- [3] Conway T M. Impervious surface as indicator of pH and specific conductance in the urbanizing coastal zone of New Jersey, USA. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85(2): 308-316.
- [4] Liu Z H, Li Y, Peng J. Progress and perspective of the research on hydrological effects of urban impervious surface on water environment. *Progress in Geography*, 2011, 30(3): 275-281.
- [5] Brabec E, Schulte S, Richards P L. Impervious surfaces and water quality: a review of current literature and its implications for watershed planning. *Journal of Planning Literature*, 2002, 16(4): 499-514.
- [6] Booth D B, Reinelt L E. Consequences of urbanization on aquatic systems-measured effects, degradation thresholds, and corrective strategies // *Proceedings. Watershed'93, A National Conference on Watershed Management*. Alexandria: Tetra Tech, 1993.

- [7] King R S, Baker M E, Whigham D F, Weller D E, Jordan T E, Kazyak P F, Hurd M K. Spatial considerations for linking watershed land cover to ecological indicators in streams. *Ecological Applications*, 2005, 15(1): 137-153.
- [8] Liu L J, Li X Y, He X Y. 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.
- [9] Arnold C L Jr, Gibbons C J. Impervious surface coverage: the emergence of a key environmental indicator. *Journal of the American Planning Association*, 1996, 62(2): 243-258.
- [10] Brahec E A. Imperviousness and land-use policy: toward an effective approach to watershed planning. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2009, 14(4): 425-435.
- [11] Groffman P M, Baron J S, Blett T, Gold A J, Goodman I, Gunderson L H, Levinson B M, Palmer M A, Paerl H W, Peterson G D, Poff N L, Rejeski D W, Reynolds J F, Turner M G, Weathers K C, Wiens J. Ecological thresholds: the key to successful environmental management or an important concept with no practical application? *Ecosystem*, 2006, 9(1): 1-13.
- [12] VØlstad J H, Roth N E, Mercurio G, Southerland M T, Strebel D E. Using environmental stressor information to predict the ecological status of Maryland non-tidal streams as measured by biological indicators. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2003, 84(3): 219-242.
- [13] Liu Z H, Li Y, Peng J. The landscape components threshold of stream water quality: a review. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(21): 5983-5993.
- [14] Booth D B, Jackson C R. Urbanization of aquatic systems: degradation thresholds, storm water detection and the limits of mitigation. *Journal of the American Water Resources Association*, 1997, 33(5): 1077-1090.
- [15] Liu Z H, Wang Y L, Peng J, Xie M M, Li Y. Using ISA to analyze the spatial pattern of urban land cover change: a case study in Shenzhen. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(7): 961-971.
- [16] Xian G, Crane M, Su J S. An analysis of urban development and its environmental impact on the Tampa Bay watershed. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85(4): 965-976.
- [17] Muggeo V M R. Estimating regression models with unknown break-points. *Statistics in Medicine*, 2003, 22(19): 3055-3071.
- [18] van Sickle J, Johnson C B. Parametric distance weighting of landscape influence on streams. *Landscape Ecology*, 2008, 23(4): 427-438.
- [19] Sliva L, Williams D D. Buffer zone versus whole catchment approaches to studying land use impact on river water quality. *Water Research*, 2001, 35(14): 3462-3472.
- [20] Huang Y L, Wang Y L, Liu Z H, Zeng X K, Chen L. Stream construction characteristics in rapid urbanization area: Shenzhen city as a case. *Geographical Research*, 2008, 27(5): 1212-1220.
- [21] Morse C C, Huryn A D, Cronan C. Impervious surface areas as a predictor of the effects of urbanization on stream insect communities in Maine, USA. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2003, 89(1): 95-127.
- [22] Griffin D M Jr, Grizzard T J, Randall C W, Helsel D R, Hartigan J P. Analysis of non-point pollution export from small catchments. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 1980, 52(4): 780-790.

参考文献:

- [2] 刘永, 郭怀成, 黄凯, 郁亚娟, 戴永立, 毛国柱. 湖泊-流域生态系统管理的内容与方法. *生态学报*, 2007, 27(12): 5352-5360.
- [4] 刘珍环, 李猷, 彭建. 城市不透水表面的水环境效应研究进展. *地理科学研究进展*, 2011, 30(3): 275-281.
- [8] 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.
- [13] 刘珍环, 李猷, 彭建. 河流水质的景观组分阈值研究进展. *生态学报*, 2010, 30(21): 5983-5993.
- [15] 刘珍环, 王仰麟, 彭建, 谢苗苗, 李猷. 基于不透水表面指数的城市地表覆被格局特征——以深圳市为例. *地理学报*, 2011, 66(7): 961-971.
- [20] 黄奕龙, 王仰麟, 刘珍环, 曾祥坤, 陈朗. 快速城市化地区水系结构变化特征——以深圳市为例. *地理研究*, 2008, 27(5): 1212-1220.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33 ,No.2 January ,2013(Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Spatio-temporal heterogeneity of water and plant adaptation mechanisms in karst regions; a review CHEN Hongsong, NIE Yunpeng, WANG Kelin (317)
- Impacts of mangrove vegetation on macro-benthic faunal communities CHEN Guangcheng, YU Dan, YE Yong, et al (327)
- Advance in research on the occurrence and transformation of arsenic in the freshwater lake ecosystem ZHANG Nan, WEI Chaoyang, YANG Linsheng (337)
- Application of nano-scale secondary ion mass spectrometry to microbial ecology study HU Hangwei, ZHANG Limei, HE Jizheng (348)
- Carbon cycle of urban system; characteristics, mechanism and theoretical framework ZHAO Rongqin, HUANG Xianjin (358)
- Research and compilation of urban greenhouse gas emission inventory LI Qing, TANG Lina, SHI Longyu (367)

Autecology & Fundamentals

- Seed dispersal and seedling recruitment of *Ulmus pumila* woodland in the Keerqin Sandy Land, China YANG Yunfei, BAI Yunpeng, LI Jiandong (374)
- Influence of environmental factors on seed germination of *Bombax malabaricum* DC. ZHENG Yanling, MA Huancheng, Scheller Robert, et al (382)
- Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometric characteristics during the decomposition of *Spartina alterniflora* and *Cyperus malaccensis* var. *brevifolius* litters OUYANG Linmei, WANG Chun, WANG Weiqi, et al (389)
- Home range of *Teratoscincus roborowskii* (Gekkonidae): influence of sex, season, and body size LI Wenrong, SONG Yucheng, SHI Lei (395)
- Effects of the covering behavior on food consumption, growth and gonad traits of the sea urchin *Glyptocidaris crenularis* LUO Shibin, CHANG Yaqing, ZHAO Chong, et al (402)
- Biological response of the rice leafhopper *Cnaphalocrocis medinalis* (Güenée) reared on rice and maize seedling to temperature LIAO Huaijian, HUANG Jianrong, FANG Yuansong, et al (409)

Population, Community and Ecosystem

- Composition and stability of organic carbon in the top soil under different forest types in subtropical China SHANG Suyun, JIANG Peikun, SONG Zhaoliang, et al (416)
- The community characteristics of different types of grassland under grazing prohibition condition ZHANG Pengli, CHEN Jun, CUI Shujuan, et al (425)
- Spatial pattern and competition relationship of *Stellera chamaejasme* and *Aneurolepidium dasystachys* population in degraded alpine grassland REN Heng, ZHAO Chengzhang (435)
- SOC decomposition of four typical broad-leaved Korean pine communities in Xiaoxing' an Mountain SONG Yuan, ZHAO Xizhu, MAO Zijun, et al (443)
- The influence of vegetation restoration on soil archaeal communities in Fuyun earthquake fault zone of Xinjiang LIN Qing, ZENG Jun, ZHANG Tao, et al (454)
- Effects of fertilization regimes on soil faunal communities in cropland of purple soil, China ZHU Xinyu, DONG Zhixin, KUANG Fuhong, et al (464)
- Woody plant leaf litter consumption by the woodlouse *Porcellio scaber* with a choice test LIU Yan, LIAO Yuncheng (475)
- The bacterial community of coastal sediments influenced by cage culture in Xiangshan Bay, Zhejiang, China QIU Qiongfeng, ZHANG Demin, YE Xiansen, et al (483)
- A study of meiofauna in the COMRA's contracted area during the summer of 2005 WANG Xiaogu, ZHOU Yadong, ZHANG Dongsheng, et al (492)
- Hydrologic regime of interception for typical forest ecosystem at subalpine of Western Sichuan, China SUN Xiangyang, WANG Genxu, WU Yong, et al (501)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Sensitivity and vulnerability of China's rice production to observed climate change XIONG Wei, YANG Jie, WU Wenbin, et al (509)

Characteristics of temperature and precipitation in Northeastern China from 1961 to 2005	HE Wei, BU Rencang, XIONG Zaiping, et al (519)
Combined effects of elevated O ₃ and reduced solar irradiance on growth and yield of field-grown winter wheat	ZHENG Youfei, HU Huifang, WU Rongjun, et al (532)
Resource and Industrial Ecology	
The study of vegetation biomass inversion based on the HJ satellite data in Yellow River wetland	GAO Mingliang, ZHAO Wenji, GONG Zhaoning, et al (542)
Temporal and spatial variability of soil available nutrients in arable Lands of Heyang County in South Loess Plateau	CHEN Tao, CHANG Qingrui, LIU Jing, et al (554)
Decomposition characteristics of wheat straw and effects on soil biological properties and nutrient status under different rice cultivation	WU Ji, GUO Xisheng, LU Jianwei, et al (565)
Effects of nitrogen application stages on photosynthetic characteristics of summer maize in high yield conditions	LÜ Peng, ZHANG Jiwang, LIU Wei, et al (576)
Urban, Rural and Social Ecology	
The degradation threshold of water quality associated with urban landscape component	LIU Zhenhuan, LI Zhengguo, YANG Peng, et al (586)
Ecological sustainability in Chang-Zhu-Tan region; a prediction study	DAI Yanan, HE Xinguang (595)
The effect of exogenous nitric oxide on activities of antioxidant enzymes and microelements accumulation of two rice genotypes seedlings under cadmium stress	ZHU Hanyi, CHEN Yijun, LAO Jiali, et al (603)
Forms composition of inorganic carbon in sediments from Dali Lake	SUN Yuanyuan, HE Jiang, LÜ Changwei, et al (610)
Fractionation character and bioavailability of Cd, Pb, Zn and Ni combined pollution in oasis soil	WU Wenfei, NAN Zhongren, WANG Shengli, et al (619)
Effects of CA and EDTA on growth of <i>Chlorophytum comosum</i> in copper-contaminated soil	WANG Nannan, HU Shan, WU Dan, et al (631)
Research Notes	
Values of marine ecosystem services in Haizhou Bay	ZHANG Xiuying, ZHONG Taiyang, HUANG Xianjin, et al (640)
Variations of <i>Leymus chinensis</i> community, functional groups, plant species and their relationships with climate factors	TAN Liping, ZHOU Guangsheng (650)
The effect of N:P supply ratio on P uptake and utilization efficiencies in <i>Larix olgensis</i> Henry. seedlings	WEI Hongxu, XU Chengyang, MA Lüyi, et al (659)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 2 期 (2013 年 1 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 2 (January, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元