

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

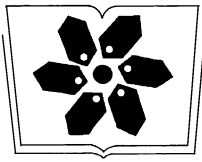
Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 17 期 Vol.33 No.17 **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 17 期 2013 年 9 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 植物角质层蜡质的化学组成研究综述 曾 琼, 刘德春, 刘 勇 (5133)
- 中国滨海盐沼湿地碳收支与碳循环过程研究进展 曹 磊, 宋金明, 李学刚, 等 (5141)

个体与基础生态

- 秸秆隔层对盐碱土水盐运移及食葵光合特性的影响 赵永敢, 逢焕成, 李玉义, 等 (5153)
- 盐地碱蓬二型性种子及其幼苗对盐渍环境的适应性 刘 艳, 周家超, 张晓东, 等 (5162)
- 不同抗旱性花生品种的根系形态发育及其对干旱胁迫的响应 丁 红, 张智猛, 戴良香, 等 (5169)
- 夏季苹果新梢生理指标与抗苹果绵蚜的关系 王西存, 周洪旭, 于 毅, 等 (5177)
- 花期海蓬子对盐胁迫的生理响应 刘伟成, 郑春芳, 陈 琛, 等 (5184)
- 白蜡多年卧孔菌生物学特性及驯化栽培 鲁 铁, 图力古尔 (5194)
- 重度火烧迹地微地形对土壤微生物特性的影响——以坡度和坡向为例
..... 白爱芹, 傅伯杰, 曲来叶, 等 (5201)
- 秸秆还田与施肥对稻田土壤微生物生物量及固氮菌群落结构的影响 刘骁蓓, 涂仕华, 孙锡发, 等 (5210)
- 大穗型小麦叶片性状、养分含量及氮素分配特征 王丽芳, 王德轩, 上官周平 (5219)
- 复合不育剂 EP-1 对小鼠空间记忆与焦虑行为的影响 王晓佳, 秦婷婷, 胡 霞, 等 (5228)

种群、群落和生态系统

- 小兴安岭阔叶红松混交林林隙特征 刘少冲, 王敬华, 段文标, 等 (5234)
- 高寒矮嵩草群落退化演替系列氮、磷生态化学计量学特征 林 丽, 李以康, 张法伟, 等 (5245)
- 中亚热带人工针叶林生态系统碳通量拆分差异分析 黄 昆, 王绍强, 王辉民, 等 (5252)
- 高寒山区一年生混播牧草生态位对密度的响应 赵成章, 张 静, 盛亚萍 (5266)
- 乳山近海大型底栖动物功能摄食类群 彭松耀, 李新正 (5274)

景观、区域和全球生态

- 采伐干扰对大兴安岭落叶松-苔草沼泽植被碳储量的影响 牟长城, 卢慧翠, 包 旭, 等 (5286)
- 西南喀斯特地区轮作旱地土壤 CO₂ 通量 房 彬, 李心清, 程建中, 等 (5299)
- 干湿季节下基于遥感和电磁感应技术的塔里木盆地北缘绿洲土壤盐分的空间变异性
..... 姚 远, 丁建丽, 雷 磊, 等 (5308)
- 东北温带次生林和落叶松人工林土壤 CH₄ 吸收和 N₂O 排放通量 孙海龙, 张彦东, 吴世义 (5320)
- 新疆东部天山蝶类多样性及其垂直分布 张 鑫, 胡红英, 吕昭智 (5329)
- 玉米农田空气动力学参数动态及其与影响因子的关系 蔡 福, 周广胜, 明惠青, 等 (5339)

天山北坡家庭牧场复合系统对极端气候的响应过程..... 李西良,侯向阳,丁 勇,等 (5353)

大城市边缘区景观破碎化空间异质性——以北京市顺义区为例..... 李 灿,张凤荣,朱泰峰,等 (5363)

资源与产业生态

基于 GLBM 模型的中国大陆阿根廷滑柔鱼鱿钓渔业 CPUE 标准化 陆化杰,陈新军,曹 杰 (5375)

三峡库区古夫河水质时空分异特征..... 冉桂花,葛继稳,苗文杰,等 (5385)

城乡与社会生态

汉、藏、回族地区农户的环境影响——以甘肃省张掖市、甘南藏族自治州、临夏回族自治州为例.....

..... 赵雪雁,毛笑文 (5397)

研究简报

中国近海浮游动物群落结构及季节变化..... 杜明敏,刘镇盛,王春生,等 (5407)

海洋污染物对菲律宾蛤仔的免疫毒性..... 丁鉴锋,闫喜武,赵力强,等 (5419)

衰亡期沉水植物对水和沉积物磷迁移的影响..... 王立志,王国祥 (5426)

伊洛河流域外来草本植物分布格局..... 郭屹立,丁圣彦,苏 思,等 (5438)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 316 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 32 * 2013-09



封面图说: 帽儿山次生林林相——帽儿山属于长白山山脉的张广才岭西坡,松花江南岸支流阿什河的上游,最高海拔 805m,由侏罗纪中酸性火山岩构成,是哈尔滨市附近的最高峰,因其貌似冠状而得名。东北林业大学于 1958 年在此建立了实验林场。山上生长着松树、榆树、杨树及各种灌木等,栖息着山鸡、野兔等野生动物,在茂密的草地上还生长有各种蘑菇。其地带性植被为温带针阔混交林,目前状况为天然次生林。部分地方次生林转变为落叶松人工林后,落叶松林地的凋落物层影响了林地土壤水分的格局。

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

DOI: 10.5846/stxb201206250892

冉桂花, 葛继稳, 苗文杰, 曹华芬, 吴述园, 程腊梅. 三峡库区古夫河水质时空分异特征. 生态学报, 2013, 33(17): 5385-5396.

Ran G H, Ge J W, Miao W J, Cao H F, Wu S Y, Cheng L M. Spatial-temporal differentiation of water quality in Gufu River of Three Gorges Reservoir. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(17): 5385-5396.

三峡库区古夫河水质时空分异特征

冉桂花¹, 葛继稳^{1,*}, 苗文杰^{1,2}, 曹华芬^{1,3}, 吴述园¹, 程腊梅¹

(1. 中国地质大学 湿地演化与生态恢复湖北省重点实验室 生态环境研究所, 武汉 430074;

2. 武汉市伊美净科技发展有限公司, 武汉 430072; 3. 湖北永业行评估咨询有限公司, 武汉 430070)

摘要:以湖北省神农架林区和兴山县境内长江三峡库区香溪河支流古夫河为研究对象,于2010年8月—2011年7月在整条河流中选取20个采样点,进行样本采集,并测定溶解氧、碱度、硬度、电导率、总磷、总氮、化学需氧量、二氧化硅、总有机碳共9项水质指标,运用多元统计方法,分析水质的时空分异特征。依据研究区土地利用类型差异,将20个采样点分成4组,即森林(A组)、耕地(B组)、水库(C组)和村镇(D组);根据该区域的水文节律,将5—10月归为湿季,其余月份为干季。判别分析和方差分析结果表明,古夫河水质具有时空显著性差异:总磷、二氧化硅、电导率、化学需氧量、总硬度和总碱度等指标具有空间显著性差异;总氮、化学需氧量、溶解氧、二氧化硅和总有机碳与季节存在显著相关性,所测9项水质指标在不同空间类别上呈现出显著的季节变化。主成分分析表明,不同空间类别上的干湿季节引起水质变化的主导因子是不同的:A组中,湿季主要体现为二氧化硅和总有机碳,干季主要体现为总磷、二氧化硅、总有机碳和化学需氧量,该组水质主要受地表径流、地质成因和风化作用等自然因素的影响;B组中,湿季主要体现为硬度和总有机碳,干季主要体现为总磷、化学需氧量、总碱度和总硬度,该组除了受自然因素的影响,还受如农业径流、未处理的生活污水排放等人为因素影响;C组中,湿季主要体现为二氧化硅、总氮和总磷,干季主要体现为总氮、总有机碳和二氧化硅,该组主要受农业径流、地表径流以及未经处理的生活污水等的影响;D组中湿季主要体现为二氧化硅、总氮和总磷,干季主要体现为碱度、硬度、总氮和总有机碳,该组主要受村镇生活污水和农业径流等的影响。结果表明,古夫河水质受自然和人为因素影响而发生变化,其中受人为因素影响更大。因此,加强水资源的管理和保护,改善水质,做好水源地的长期水质监测显得尤为重要。

关键词:判别分析;主成分分析;水质;时空分异;古夫河

Spatial-temporal differentiation of water quality in Gufu River of Three Gorges Reservoir

RAN Guihua¹, GE Jiwen^{1,*}, MIAO Wenjie^{1,2}, CAO Huafeng^{1,3}, WU Shuyuan¹, CHENG Lamei¹

1 Hubei Key Laboratory of Wetland Evolution & Ecological Restoration, Institute of Ecology and Environmental Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2 Wuhan Imagination Science and Technology Development Co., Ltd., Wuhan 430072, China

3 Hubei Realhom Appraisal & Consulting Co., Ltd., Wuhan 430070, China

Abstract: In order to provide scientific supports for rivers ecological management of the Three Gorges Reservoir, we conducted a study to determine the spatial and temporal differentiation of water quality in the Gufu River. Gufu River, a tributary of Xiangxi River flowing into Three Gorges Reservoir, passes Shennongjia Forest District and Xingshan County, Hubei Province, Central China. We arranged 20 sampling sites along the Gufu River and measured 9 water quality parameters once a month from August 2010 to July 2011 at these sites. According to landscape difference, the sampling sites

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40972218);中国地质大学(武汉)中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(G1323521125, G1323521225)

收稿日期:2012-05-25; 修订日期:2013-03-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gejiwen2002@aliyun.com

were divided into 4 groups: forest area (Group A), cultivated land area (Group B), reservoir area (Group C), village/small town area (Group D). According to hydrological rhythm, May to August were classed as wet season, and the other months were classed as dry season. The 9 water quality parameters were: total nitrogen (TN), dissolved oxygen (DO), total organic carbon (TOC), total phosphorus (TP), silicon dioxide (SiO_2), electrical conductivity (EC), chemical oxygen demand (COD), total hardness (T-Hard) and total alkalinity (T-Alk). Using the Discriminant Analysis (DA) and Analysis of Variance (ANOVA), we found the water quality showed spatial and temporal differentiation pattern: TP, SiO_2 , EC, COD, T-Hard and T-Alk are significantly different among the different spatial group; TN, COD, DO, SiO_2 and TOC are different among the seasons; all water quality parameters presented significant seasonal changes at different spatial types. Using the Principal Component Analysis (PCA), we found the factor determining the water quality at different part of the river in different seasons. At the forest area (Group A), SiO_2 and TOC were the main factors which affect the water quality in the wet seasons, but in the dry seasons TP, SiO_2 , TOC and COD were the mainly factors, which indicated that in forest area water quality was influenced by the natural factor such as surface runoff, vegetation and weathering. At the cultivated land area (Group B), in the wet season, T-Hard and TOC were the main factors affecting water quality while in the dry season TP, COD, T-Hard and T-Alk were the main factors affecting water quality. In cultivated land area, the variation of water quality was not only caused by the influence of natural factors, but also by factors of human activities such as agricultural runoff and domestic sewage without treatment. At reservoir area (Group C), SiO_2 , TN and TP were the main factors affecting water quality in the wet season, while TN, TOC and SiO_2 were the main factors in the dry seasons. The water quality of the stream beside the villages/ small towns was influenced by nitrogen and phosphorus particle entering into reservoir with farmland runoff, surface runoff and untreated domestic sewage. At village/ small town area (Group D), SiO_2 , TN and TP were the main factors affecting water quality in the wet season, while T-Alk, T-Hard, TN and TOC were the main factors in the dry seasons. The water quality at the village/ small town area was influenced by municipal sewage, agricultural runoff. Our study indicated that the water quality of Gufu River is affected by natural and anthropogenic factors and the later one are greater. Therefore, the strengthening of the management and protection of water resources and good long-term water quality monitoring is particularly important for the improvement of water quality.

Key Words: Discriminant Analysis (DA); Principal Component Analysis (PCA); water quality; spatial-temporal disparity; Gufu River

长江三峡大坝是中国乃至世界上最大的水利枢纽工程,它在发电、防洪、航运等方面给我国带来巨大的经济效益,同时其带来的水环境问题也已经成为社会各界关注的焦点^[1]。三峡工程自运行以来,库区各大支流受长江回水的顶托而形成库湾,库湾水体富营养化现象陆续出现,且恶化速度不断加快,其中,香溪河尤为突出。香溪河作为三峡水库靠近坝址最近的最大一级支流,水库蓄水后,已多次暴发水华^[2],为此,许多学者相继开展了大量的相关研究^[3-5]。然而,大部分研究都集中在香溪河干流,对其支流研究甚少。笔者认为,要想弄清香溪河流域乃至三峡库区的水质状况,需要对其支流水质开展研究,从源头追踪到库湾分析水质的变化情况,以更加科学、可靠的研究方法了解香溪河流域的水环境状况,推测其富营养化根源;再则,古夫河流域的土地利用格局在空间上存在显著差异,河流水质不仅易受到水土流失、大气降水和植被演替等自然因素的影响,还易受到土地利用、生活污水、工农业废水和水资源过度开发等人为因素的影响。古夫河河流水质变化会对该河流乃至香溪河水域生态系统产生一系列的影响^[6]。因此,通过探究古夫河河流水质变化,不仅能更清楚了解该河流的水质状况,为古夫河水资源管理和保护提供科学可靠的动态信息;也能为全面把握香溪河流域的水质变化积累基础数据,这对于分析香溪河近年生态变化的原因,具有一定的科学及应用价值。

多元统计方法中的聚类分析(CA),主成分分析(PCA)以及判别分析(DA)是研究河流水质变化特征和源识别的有效工具,已得到国内外学者的广泛应用^[7-14]。Singh等^[14]综合运用CA、PCA和DA对印度 Gomti

河流进行水质时空特征分析,识别出引起该河流水质变化的自然和人为污染源;赵广举等^[10]利用 CA 和 PCA 分析了太湖流域的水质特征;Kannel 等^[11]综合运用 CA、PCA 和 DA 在分析加德满都(尼泊尔)巴格马蒂河的水质时空变化特征的基础上,探讨了水质时空变化与土地利用类型的关系;Mendiguchia 等^[13]运用 CA 和 PCA 对西班牙瓜达基维尔河的人为因素影响进行了评价;Alberto 等和 Qadir 等用多元统计方法分别对阿根廷 Suquia 河流和巴基斯坦杰纳布河支流的水质时空变化特征进行了分析^[7,12]。

本文以香溪河第一支流古夫河为研究对象,根据土地利用类型,并结合多元统计分析方法探讨古夫河河流水质时空分异特征,识别影响河流水质变化的主导水质因子,探讨导致该流域水质时空分布格局的原因,以期对香溪河流域乃至三峡库区水资源管理和保护提供科学依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

古夫河是三峡库区一级支流香溪河上游的主要支流,发源于湖北省神农架林区的骡马店,流域面积 1189 km²。古夫河河道平均坡降 20‰,干流长 68 km。该流域属于亚热带大陆性季风气候,雨量充沛,地形复杂,高低悬殊,气候垂直差异大。土壤类型随海拔变化而变化,海拔 800 m 以下为黄壤,800—1000 m 为黄棕壤,1000 m 以上为棕壤。区域植被垂直分布格局显著^[15],地带性植被为常绿阔叶林,现存植被为以针阔混交林为主的天然次生林。主要森林乔木种有马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、曼青冈(*Quercus oxyodon*)、栓皮栎(*Quercus variabilis*)、茅栗(*Castanea seguinii*)、鹅耳枥(*Carpinus turczaninowii*)、化香(*Platycarya strobilacea*)等。河岸带植被以茅栗、枫杨(*Pterocarya stenoptera*)、马桑(*Coriaria sinica*)、鸢尾(*Iris tectorum*)等为主。研究区域土地利用类型有森林(次生林为主)、耕地、水库和村镇等。流域矿产资源丰富,尤其是磷矿资源丰富,是湖北兴(山)神(农架)保(康)磷矿的主产区。

1.2 研究方法

1.2.1 水样的采集与测量

本研究从 2010 年 8 月—2011 年 7 月对古夫河进行了为期 1a 的采样,从河流源头到与香溪河交汇处共设 20 个采样点,分别为 GF(古夫)01—15、GF15a、GF16—19,各点之间海拔相差 50—100 m,采样点具体分布见图 1。

所选取的点位覆盖整个河流,能包含整个古夫河河流的水文特征。选用 600 mL 清洁的聚乙烯瓶在水下 1/2 深度处进行水样采集。选取的 9 个水质指标有总磷(Total phosphorus, TP)、总氮(Total nitrogen, TN)、化学需氧量(Chemical oxygen demand, COD)、溶解氧(Dissolved oxygen, DO)、碱度(Total alkalinity, T-Alk)、硬度(Total hardness, T-Hard)、二氧化硅(Silicon dioxide, SiO₂)、电导率(Electrical conductivity, EC)、总有机碳(Total organic carbon, TOC)。其中 DO 采用美国金泉 YSI 550A 型便携式溶解氧测量仪现场测量,电导率使用意大利哈纳 HANNA HI8733 现场测量,其它指标的测定均按照国家标准《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)推荐的方法。

1.2.2 数据分析

本文首先根据该区的土地利用差异进行空间分类,按照水文节律进行季节分类;然后基于分类结果,用判别分析识别具有空间显著性差异的水质指标;再在不同空间类别上分析时间尺度水质分异特征;最后,运用主成分分析方法进一步研究不同空间类别上干、湿季节分别影响河流水质时空分异的潜在因素^[7,16]。

为了消除数据单位和量纲不同的影响,进行主成分分析前,需对原始数据进行标准化,以提高分析结果的可信度。上面所述分析均在 IBM SPSS Statistics 19.0 和 Microsoft Office Excel 2007 中实现。

2 结果与讨论

2.1 空间尺度水质特征分异性分析

将 20 个采样点按其土地利用类型进行分类,共分成 4 类,即森林、耕地、水库和村镇,分类结果见表 1。结合采样点的分布示意图(图 1)以及表 1 可以看出, A 组的采样点分布在两岸植被覆盖率高、受人为干扰小

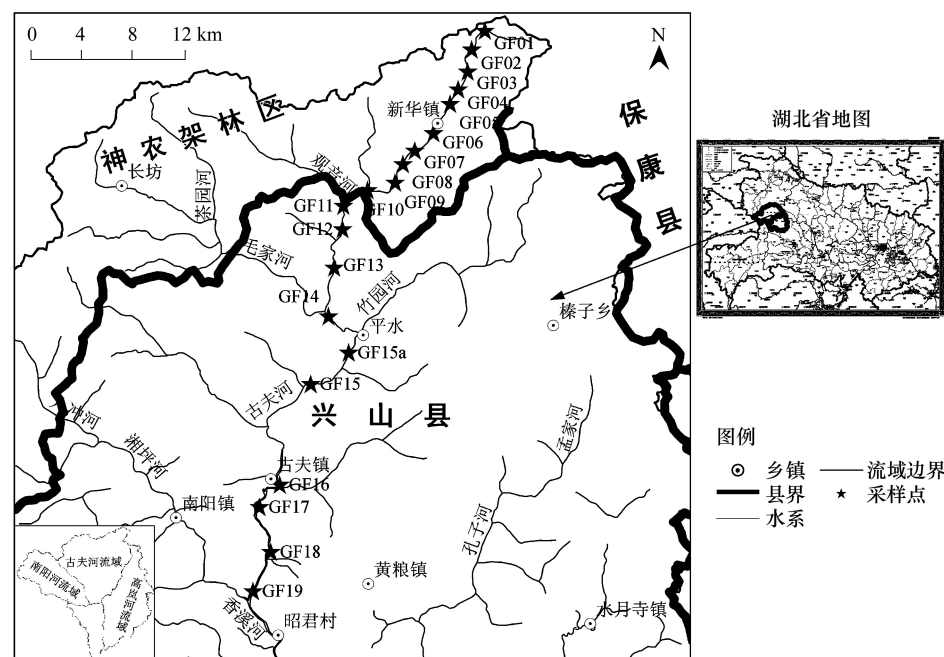


图 1 古夫河地理位置及其采样点分布图

Fig.1 Study area and sampling points distribution

的河段,河流水质良好;B 组的采样点分布在以耕地为主的河段,途经农业和村镇区,没有工业活动,主要污染来自农业地表径流和未处理的生活污水直接进入河流;C 组以水库为主,受人为干扰较严重;D 组为村镇区,受人为干扰最为严重。

表 1 采样点的土地利用类型

Table 1 Land use types of all sampling sites

土地利用类别 Land use types	采样点 Number of the sampling location
森林 Forest (A 组 Group A)	GF01,GF02 ,GF03,GF04
耕地 Cultivated land (B 组 Group B)	GF05,GF06,GF07,GF08,GF09,GF 12,GF13
水库 Reservoir (C 组 Group C)	GF10,GF11,GF14,GF15,GF15a,GF18,GF19
村镇 Village and small town (D 组 Group D)	GF16,GF17

采用 Wilks'λ 判别分析法分析聚类结果,对表征组间空间显著性差异的水质指标进一步验证和识别,得到统计检验结果(表 2)、结构矩阵(表 3)和分类函数系数矩阵(表 4)。从表 2 中可以看出 3 个判别函数基本上解释了所有水质指标,Wilks'λ 和卡方系数分别为 0.002—0.287 和 16.245—79.219。判别函数 1 和 2 的显著性检验值均小于 0.01,表明空间分类有效。判别函数 3 的显著性检验值大于 0.01,进一步表明判别函数 1 和 2 的有效性。

表 2 空间尺度判别分析统计检验

Table 2 Eigenvalue, Wilks' lambda and Chi-Sqr. Test of spatial DA

判别函数 Discriminant function	特征值 Eigenvalue	相关性 Relevance	Wilks 的 λ 值 Wilks'λ	卡方系数 Chi-square	自由度 d/f	显著性 Significance
1	22.483	0.978	0.002	79.219	24	0.000
2	4.4079	0.903	0.053	38.188	14	0.000
3	2.489	0.845	0.287	16.245	6	0.012

从判别函数的结构矩阵(表3)及分类函数系数(表4)可以看出,判别函数由6个水质指标构建,即TP、SiO₂、EC、COD、T-Hard、T-Alk。这6个水质指标可用来识别A组、B组、C组和D组4个河段,它们的空间差异性及其变化规律见图2。TP的最大平均值出现在C组中,其次是D组,显著高于组间不存在显著性的A、B组。COD的最大平均值出现在D组中,显著高于组间不存在显著性的A、B、C组。EC最大平均值出现在B组中,最小平均值出现在A组中,表现出组间显著性差异。T-Hard和T-Alk在四组中的浓度高低顺序是B组>A组>C组>D组,表现出显著的组间差异。SiO₂的最小平均值出现在D组中,显著低于组间不存在显著性差异的A、B、C组(图2)。从以上6个指标的分析中可以看出,C、D两个区域中,TP、COD相对于其他区域偏高,造成这一结果的可能原因是这两个区域内土地利用类型多样(林地、水库、村镇、耕地以及工矿企业),受到自然、农业、工业和生活污水等多因素的影响。SiO₂主要与河道风化过程的输送有关^[17],其平均值为2.33 mg/L,与李凤清等^[18]2000—2006年对香溪河流域(古夫河)水环境因子监测(SiO₂浓度为2.64—5.90 mg/L)相比,硅的输送量有所降低,可能与水利工程建设、污水排放等人类活动有关^[19]。

表3 结构矩阵
Table 3 Structure matrix

变量 Variable	函数 Function		
	1	2	3
总磷 Total phosphorus TP	0.368	0.570	-0.031
二氧化硅 Silicon dioxide SiO ₂	0.111	-0.552	0.125
电导 Electrical conductivity EC	-0.015	-0.221	0.519
化学需氧量 Chemical oxygen demand COD	-0.049	0.245	0.095
硬度 Total hardness T-Hard	0.034	-0.044	0.395
溶解氧 Dissolved oxygen DO ^(a)	-0.202	-0.044	-0.434
碱度 Total alkalinity T-Alk	-0.056	-0.506	0.330
总氮 Total nitrogen TN ^(a)	-0.038	-0.028	-0.392
总有机碳 Total organic carbon TOC [*]	0.027	0.484	0.137

* 表示分析中未使用该变量

表4 空间尺度判别分析的分类函数系数
Table 4 Classification function coefficients of spatial DA

变量 Variable	采样点类别 Sampling points category			
	A组 Group A	B组 Group B	C组 Group C	D组 Group D
TP	-2534.51	-2489.16	-552.47	-3204.00
SiO ₂	-128.58	-129.08	-86.56	-179.42
EC	0.52	0.68	1.19	0.23
COD	377.03	385.74	321.66	448.08
T-Hard	40.14	42.59	34.42	49.28
T-Alk	9.37	9.59	8.06	10.14
常量 Constant	-1983.34	-2124.55	-1855.47	-2139.94

Fisher's 线性判别函数

2.2 不同空间类别上时间尺度水质特征分异性分析

由于三峡库区年降雨量的81.09%集中分布在5—10月^[20-21]。据此,本文将该区的5—10月划分为湿季,其余月份归为干季。水质参数的时间变化通过季节参数相关矩阵进行评价。通过单因素方差分析(One-Way ANOVA),除了TP、EC、T-Hard、T-Alk以外,TN、COD、DO、SiO₂和TOC与季节存在显著的相关性($P<0.05$)。这些显著性指标中,COD具有最大的相关系数(Spearman's $R=-0.866$),其次是DO($R=0.793$),SiO₂($R=-0.736$),TOC($R=0.546$)以及TN($R=-0.450$)。与季节相关的参数可以被视为引起水质时间变化的主要指标。

在不同空间类别上,随着季节的变化,TP、TN、COD、SiO₂均呈现下降的趋势(图3)。TP在A和B组中变

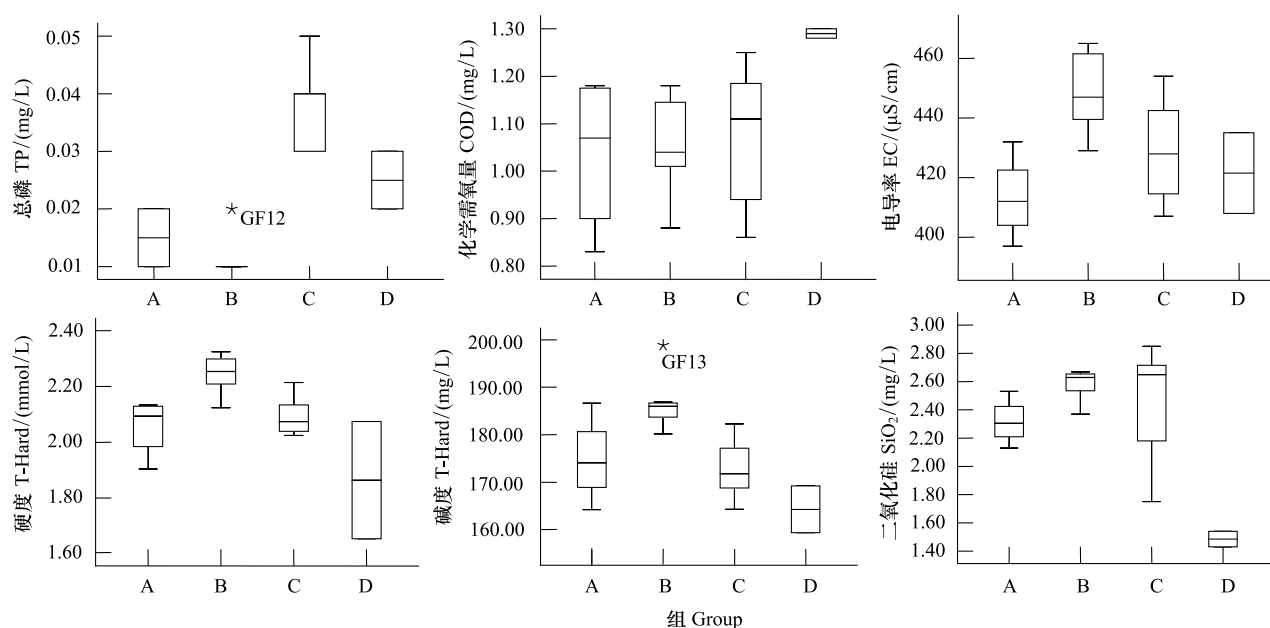


图2 6个显著性水质指标的空间差异性

Fig.2 Spatial variations of six water quality indexes

TP:总磷 Total phosphorus; COD:化学需氧量 Chemical oxygen demand; EC:电导 Electrical conductivity; T-Hard: 硬度 Total hardness; T-Alk: 碱度 Total alkalinity; SiO₂: 二氧化硅 Silicon dioxide

幅较大,在 C 和 D 组中变幅较小。A 组(森林)中,可能由于枯枝落叶的输入给河流提供一定的有机质,在一定程度上促进对可溶性磷的吸收,使得 TP 有所下降;B 组(耕地)在干季,耕地中进行的农业活动将造成土壤中磷增加,没有被作物吸收的磷吸附在土壤表面,在湿季的大量降雨过程中,磷随土壤颗粒一起进入河流,使其 TP 的变幅大。TN 在 A 组中变幅大,在其他组中变幅小。A 组中,由于地势陡峭,高低悬殊,在湿季的强降雨过程中,对河道底质的冲刷剧烈使得氮含量增加。另外,湿季,树木茂盛,水面接受的光照强度下降,水体中初级生产力和养分需求均下降^[22],使得氮增加。有研究发现^[23-24],在农业区的溪流水质的季节变化差异大于森林地区,而本研究中的结论为两者的差异不大。COD 和 SiO₂在各组中的变幅均较大,而 D 组(村镇)变幅最大。湿季,有机生活污水随降雨形成雨水径流进入河流,使得河流中 COD 浓度增加^[25];大量降雨导致水土流失,水体含沙量增加将造成 SiO₂增加^[26]。也有研究表明,水中 SiO₂与降雨量和流量成正相关^[27],本次研究结果与之相符。气温是 DO 季节变化的主要因素(图 3),温度越高,水体中氧气更容易饱和^[28]。EC, T-Hard 和 T-Alk 均表现为 A 组和 B 组湿季大于干季,而 C 组和 D 组干季大于湿季(图 3)。有研究^[29]表明,溪流中 EC 与 T-Hard、T-Alk 以及溶解性盐类有明显的相关性,与本次研究结果一致。EC 在各组中的变幅均较大。在 C 组(水库为主),由于大量降水对离子的稀释,而致使 EC 降低;D 组中,干季河流水量少,而干扰并没有降低,致使干季大于湿季。湿季, A 组中森林溪流地势复杂,降雨对河流底质的扰动大,底质中的溶解性盐类进入水中;而 B 组中,随着湿季的到来,刚经过农业活动的疏松土壤及其携带的溶解性盐类易随降雨进入河流,使得离子浓度增加。T-Hard 和 T-Alk 在 C、D 组中变幅大, A、B 组中变化不明显。T-Hard 和 T-Alk 与矿化度成正相关,枯水期矿化度大主要是与雨量稀少、气候干燥、蒸发剧烈,气温日差大有关^[30]。随着季节的变化,在 A 组中 TOC 呈下降趋势,而在其他组中呈上升趋势,且各组中的变化幅度较大(图 3)。在 A 组中,受人为干扰小,且地势较为陡峭,湿季雨水充沛,易对河床底质冲刷,使得土壤中的有机物及其枯枝落叶中的有机物进入到水中,湿季大于干季。B、C、D 组中呈现上升的趋势。湿季降雨使得水体中悬浮物增加而造成水的透光性减弱,抑制浮游植物的生长,使得水体中的自生有机碳降低,同时较大的水流也稀释了水中的自生有机碳。另外,外源颗粒物(如地表径流侵蚀冲刷)中的有机碳含量比河流生物量的有机碳低。

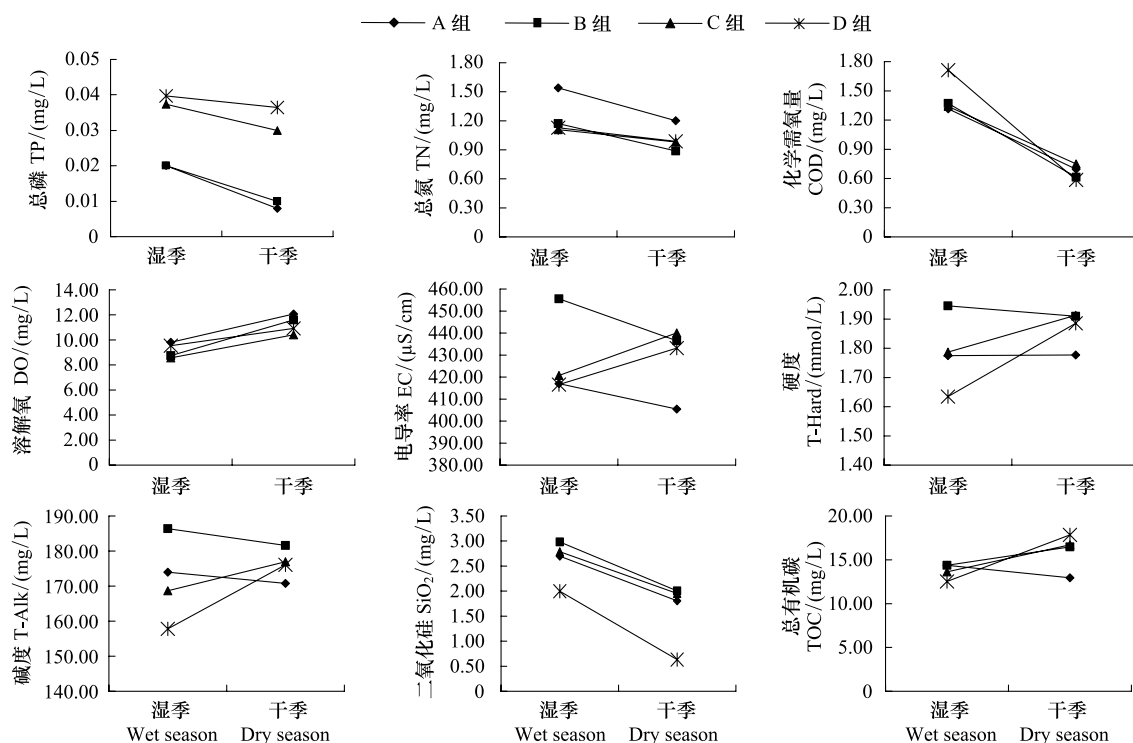


图3 不同空间类别上水质的季节变化

Fig.3 The seasonal variations of water quality at different spatial types

TN:总氮 Total nitrogen; DO:溶解氧 Dissolved oxygen; TOC:总有机碳 Total organic carbon

2.3 水质时空分异特征的影响因子识别

为进一步探究不同空间类别上干、湿季节引起河流水质变化的水质指标,本文按照特征值大于1的原则^[14,31],对不同空间类别上干湿季节水质指标进行主成分分析(表5),结果表明,A组中湿季提取的3个主成分累计频率为90.46%,干季提取的4个主成分累计频率为100%;B组中湿季提取的3个主成分累计频率为93.02%,干季2个主成分的累计频率为86.73%;C组中湿季和干季提取的3个主成分累计频率分别为89.56%和92.48%;D组中湿季和干季提取的4个主成分累计频率分别为93.25%和100%。以上的累积频率均超过85%,基本包含了9项水质指标的全部信息。

对于A组,①湿季中,与第1主成分(方差贡献率为38.99%)密切相关的是TOC、SiO₂和EC,代表水体中含有机物、硅和离子水平,与第2主成分(占27.57%)密切相关的是TN、COD和T-Hard,代表水体中的含氮、有机物和碱度水平,与第3主成分(占23.89%)相关的是T-Alk和TP,代表水中含磷和碱度水平。总体来说,A组中的湿季,SiO₂和TOC是影响河流水质变化的主导因子,其次是TN、COD、T-Hard、T-Alk和TP。②干季中,与第1主成分(方差贡献率为37.23%)密切相关的是TOC、SiO₂、TP和COD,代表水体中含磷、硅和有机物水平;与第2主成分(占26.19%)密切相关的是TN和EC,代表水体中的含氮和离子水平;与第3主成分(占22.81%)相关的是T-Hard和T-Alk,代表水中含硬度和碱度水平;与第4主成分(占13.76%)相关的是DO,代表水体自净能力。表明A组在干季中,TP、SiO₂、TOC和COD是影响河流水质变化的主导因子,其次是TN、T-Hard和T-Alk。

A组所对应的区域属于神农架林区,人为干扰小,湿季氮、磷主要来自地表径流。在干季,氮、磷亦占较大的比重。磷可能与该区地质成因磷有关,氮也可能与河流本身的“地质氮”(基岩中NO₃-N)有关^[32]。TOC代表水体中的有机物含量,可能与该地植被覆盖率高、进入水体中的枯枝落叶丰富有关^[33]。该河段基本未受到污染,T-Hard和T-Alk表明河流水质主要由矿物质组成,符合山区河流水质特性^[34]。

表 5 不同空间上不同季节的 9 个水质指标的最大方差旋转主成分分析结果

Table 5 Principal component analysis result of 9 measured variables on VARIMAX rotated factors at different seasons in different spatial types

变量 Variable	A 组 Group A							B 组 Group B							
	湿季 Wet season			干季 Dry season				湿季 Wet season				干季 Dry season			
	VF1	VF2	VF3	VF1	VF2	VF3	VF4	VF1	VF2	VF3	VF4	VF1	VF2	VF3	VF4
TP	0.322	0.176	0.914	0.904	0.417	-0.033	-0.091	0.423	0.850	-0.042		-0.988	0.137		
TN	0.070	0.983	0.021	-0.071	-0.988	-0.133	-0.035	0.018	0.054	0.976		-0.248	-0.896		
COD	0.178	0.729	0.488	0.868	0.108	0.462	0.143	-0.074	0.742	0.661		0.847	0.252		
DO	0.684	-0.546	-0.359	0.074	0.157	0.102	0.980	0.955	0.032	0.239		0.688	0.507		
EC	0.838	0.316	0.058	-0.242	0.950	-0.026	0.194	0.252	-0.944	-0.180		-0.040	0.982		
T-Hard	0.628	0.650	0.214	-0.063	-0.081	-0.988	0.119	0.829	0.215	0.072		-0.922	0.021		
T-Alk	0.279	-0.113	-0.947	0.134	0.005	0.892	0.431	-0.347	-0.888	-0.017		0.948	0.003		
SiO ₂	0.903	0.325	0.008	0.911	-0.368	0.172	0.077	0.663	0.097	0.722		0.662	-0.671		
TOC	0.955	-0.120	0.042	-0.928	0.354	0.089	-0.073	0.961	0.033	-0.140		0.003	0.911		
方差 Variance	3.51	2.48	2.15	3.35	2.36	2.05	1.24	3.33	3.01	2.03		4.42	3.39		
方差贡献率 Percentage of variances/ %	38.99	27.57	23.89	37.23	26.19	22.81	13.76	36.99	33.48	22.54		49.09	37.65		
累积贡献率 Cumulative/ %	38.99	66.56	90.46	37.25	63.43	86.25	100.00	36.99	70.48	93.02		49.09	86.73		

变量 Variable	C 组 Group C							D 组 Group D							
	湿季 Wet season			干季 Dry season				湿季 Wet season				干季 Dry season			
	VF1	VF2	VF3	VF1	VF2	VF3	VF4	VF1	VF2	VF3	VF4	VF1	VF2	VF3	VF4
TP	-0.832	-0.222	0.406	-0.232	0.242	0.941		0.270	0.882	0.346	0.169	-0.229	-0.020	-0.023	0.973
TN	0.901	0.298	0.130	-0.919	-0.123	-0.242		0.924	-0.016	-0.163	0.048	-0.010	-0.970	0.242	0.004
COD	0.107	0.852	0.078	0.361	0.239	0.900		0.161	0.186	0.185	-0.814	-0.030	-0.123	-0.974	-0.189
DO	0.325	0.316	0.888	0.210	0.806	0.070		-0.110	0.450	0.175	0.819	0.906	-0.364	0.062	-0.205
EC	0.449	-0.814	0.171	0.837	0.276	0.0219		-0.282	-0.866	0.113	0.397	0.735	0.644	0.161	-0.138
T-Hard	0.502	0.734	0.420	-0.104	-0.912	-0.255		0.143	-0.950	0.233	0.060	-0.013	-0.064	0.045	0.997
T-Alk	-0.350	-0.786	-0.036	0.050	0.963	0.227		-0.304	-0.369	-0.752	0.310	0.817	0.302	-0.170	-0.460
SiO ₂	0.966	-0.106	0.132	-0.760	0.432	0.484		0.947	-0.086	-0.016	-0.256	-0.020	-0.083	0.990	-0.112
TOC	-0.207	-0.112	0.939	0.915	0.229	-0.329		-0.363	0.129	0.897	0.210	-0.142	0.952	0.261	0.071
方差 Variance	3.17	2.80	2.08	3.20	2.86	2.27		2.66	2.09	1.91	1.73	2.58	2.51	2.12	1.79
方差贡献率 Percentage of variances/ %	35.26	31.16	23.15	35.58	31.72	25.18		29.56	23.22	21.24	19.23	28.62	27.93	23.52	19.94
累积贡献率 Cumulative / %	35.26	66.41	89.56	35.58	67.30	92.48		29.557	52.774	74.016	93.25	28.622	56.548	80.064	100.00

VF: 主成分

对于 B 组,①湿季中,与第 1 主成分(方差贡献率为 36.99%)密切相关的是 DO、T-Hard 和 TOC,代表水体中含氧、硬度和水平,与第 2 主成分(占 33.48%)密切相关的是 T-Hard、EC、T-Alk、TP 和 COD,代表水体中的含离子、碱度、磷和有机物水平,与第 3 主成分(占 22.54%)相关的是 TN 和 SiO₂,代表水中含氮和硅水平。总体来说,B 组中的湿季,T-Hard 和 TOC 是影响河流水质变化的主导因子,其次是 T-Alk、TP、COD、TN 和 SiO₂。②干季中,与第 1 主成分(方差贡献率为 49.09%)密切相关的是 TP、COD、T-Hard 和 T-Alk,代表水体中含磷、有机物、硬度和碱度水平;与第 2 主成分(占 37.65%)密切相关的是 EC、TN 和 TOC,代表水体中的含离子、氮和有机物水平。表明 B 组中干季,TP、COD、SiO₂和 TOC 是影响水质变化的主导因子,其次是 TN 和 TOC。

B 组对应的区域,主要是耕地、林地和村镇居民,湿季氮、磷污染主要来自农业径流、地表径流以及未经处理的生活污水;干季,氮和磷主要来自未经处理的生活污水,该季节河流中水量相对少,污水进入河流不能迅

速被稀释和净化,致使氮、磷含量偏高。TOC 和 COD 代表的有机污染主要是来自未经处理的生活污水和耕地径流。EC 代表水中离子浓度,与水中碱度、硬度和溶解性盐有关^[29]。

对于 C 组,①湿季中,与第 1 主成分(方差贡献率为 35.26%)密切相关的是 SiO_2 、TN 和 TP,代表水体中含硅、氮和磷水平,与第 2 主成分(占 31.16%)密切相关的是 COD、EC、T-Alk 和 T-Hard,代表水体中的含有机物、离子、碱度和硬度水平,与第 3 主成分(占 23.15%)相关的是 DO 和 TOC,代表水体中含氧和有机物水平。总体来说,C 组中的湿季, SiO_2 、TN 和 TP 是影响河流水质变化的主导因子,其次是含 COD、EC、T-Alk 和 T-Hard。②干季中,与第 1 主成分(方差贡献率为 35.58%)密切相关的是 TN、TOC、EC 和 SiO_2 ,代表水体中含氮、有机物、离子和硅水平;与第 2 主成分(占 31.72%)密切相关的是 DO、T-Hard 和 T-Alk,代表水体中的含氧、硬度和碱度水平;与第 3 主成分(占 25.18%)相关的是 TP 和 COD,代表水体中含磷和有机物水平。C 组在干季,TN、TOC 和 SiO_2 是影响水质变化的主导因子,其次是 T-Alk、T-Hard、TP 和 COD。

C 组对应的区域,土地利用类型多样,包括有水库、耕地、村镇和林地。水土流失、农业径流、地表径流以及未经处理的生活污水携带更多的氮、磷颗粒进入水库,致使水中氮、磷的含量高,这些离子进入水库,也会使水中 EC 增加。在干季该区水质也受到氮、磷的影响,可能是由于水库中藻类死亡分解导致水体中溶解性营养盐增加^[35]。对于采样点 GF18 位于水库下方,水质经过水库的混合后,水质并没有好转。该点的左、右两侧皆是柑橘林。河流氮、磷主要来自柑橘林地、裸露坡地的径流携带大量含氮、磷的泥沙,与王晓燕等^[36]的研究相一致。干湿季节,水库型河段均与 SiO_2 有密切联系,进一步说明,电站建设、水库蓄水会影响到水中的二氧化硅的通量^[19]。TOC 一方面受到水库截留,另一方面库区浮游植物光合作用较强,对有机质的贡献大大增加^[37]。

对于 D 组,①湿季中,与第 1 主成分(方差贡献率为 29.56%)密切相关的是 SiO_2 和 TN,代表水体中含硅和氮水平,与第 2 主成分(占 23.22%)密切相关的是 T-Hard、TP 和 EC,代表水体中的含硬度、磷和离子水平,与第 3 主成分(占 21.24%)相关的是 TOC 和 T-Alk,代表水体中含有机物和碱度水平。与第 4 主成分(占 19.23%)相关的是 DO 和 COD,代表水体含有机物和氧水平。总体来说,D 组中的湿季, SiO_2 、TN、TP 是影响河流水质变化的主导因子,其次是 T-Hard、T-Alk、TOC 和 COD。②干季中,与第 1 主成分(方差贡献率为 28.62%)密切相关的是 DO、T-Alk 和 EC,代表水体中含氧、碱度和离子水平;与第 2 主成分(占 27.93%)密切相关的是 TN 和 TOC,代表水体中的含氮和有机物水平;与第 3 主成分(占 23.52%)相关的是 COD,代表水体中含有机物水平;与第 4 主成分(占 19.94%)相关的是 TP 和 T-Hard,代表水体含磷和硬度水平。表明 D 组在干季中,T-Alk、T-Hard、TN 和 TOC 是影响河流水质变化的主导因子,其次是 COD 和 TP。

D 组所在区域经过村镇、工矿企业、耕地,土地受到严重的干扰,主要表现在部分耕地变成建筑用地和裸地。该组中氮、磷主要来自村镇生活污水、农业活动产生的地表径流以及其他生产活动产生污水直接进入河流。EC 主要是由于村镇生活污水和农业生产活动的输入,水质的离子浓度增加所致。COD 和 TOC 代表的有机污染主要来自村镇产生的生活污水、农业径流和工业废水^[38]。另外,TOC 还可能来源于上游库区初级生产积累的有机碳随水流下泄到下游河段^[39]。

综上所述,不同空间类别上不同季节的河流水质时空分异特征的影响因子主要为以下 4 种类型:营养盐(TN 和 TP)、一般可溶性盐(T-Hard、T-Alk、EC 和 SiO_2)、物理参数(DO)和有机物(TOC 和 COD)。其中,营养盐以及以 T-Hard、T-Alk 为代表的一般可溶性盐类是影响河流水质变化的主导因子。氮、磷营养盐来自自然(地表径流、水土流失、植被、风化作用和地质成因等)和人为(农业径流、生活污水排放等)因素的点源、非点源污染。一般溶解性盐类的 T-Hard、T-Alk、EC 和 SiO_2 (可溶性硅),代表水体中的离子水平。由于该区为石灰岩地质^[18],河流水体的 T-Hard 和 T-Alk 普遍偏高,T-Hard 的变化范围为 1.59—2.36mmol/L, T-Alk 的变化范围为 144.15—196.76mg/L,河流 EC 表征河流水体中溶解盐的含量,主要表现为与水体中的 T-Hard 和 T-Alk 相关,在人类活动较频繁的 D、C、B 组,还受农业活动和生活污水排放等人为因素影响,如土地利用^[40]、水电开发^[41]等。 SiO_2 主要与河道风化过程的输送有关,也受到电站建设、污水排放等人为活动影响^[19]。DO 仅与河

流本身有关,DO 变化范围为 8.6—10.9 mg/L,均达到饱和状态,说明河流具有强的自净能力。TOC 和 COD 代表水中的有机物水平,TOC 主要源于外源即地表径流的侵蚀冲刷和内源即河流水生植物的生长而增加的有机碳。COD 来自有机生活废水、农业径流以及工业废水。

3 结论与研究展望

本文运用多元统计方法研究了古夫河河流水质时空分异特征。

(1) 根据土地利用类型差异将空间采样点分成 A、B、C 和 D 组,按照该区域的水文节律将采样时间分为干季和湿季。

(2) 通过空间判别分析和显著性检验得出,古夫河河流水质指标 TP、SiO₂、EC、COD、T-Hard 和 T-Alk 具有空间显著性差异。通过单因素方差分析,TN、COD、DO、SiO₂ 和 TOC 与季节存在显著的相关性,且所有水质指标在不同空间类别上呈现出季节的显著变化。

(3) 对不同空间类别上的干湿季节进行主成分分析表明 ① A 组中, SiO₂、TP、TOC 和 COD 是引起水质变化的主导因子,该组主要来自自然因素的影响,如地表径流、地质成因以及风化作用。② B 组中, TP、T-Hard、COD、T-Alk、TOC 和 TN 是引起水质变化的主导因子,该组除了受自然因素的影响,还受人为因素影响,如农业径流、未处理的生活污水排放。③ C 组中, TN、TP、SiO₂、TOC 和 EC 是引起水质变化的主导因子,主要与农业径流、地表径流以及未经处理的生活污水有关,这些污水携带氮、磷颗粒进入水库,致使水中氮、磷等溶解性营养盐的含量高,进而使水中 EC 增加。水库中藻类死亡分解也可能导致水体中溶解性营养盐增加。④ D 组中, TN、TP、SiO₂、T-Alk、T-Hard 和 TOC 是影响水质变化的主导因子,主要来自村镇生活污水、农业活动产生的地表径流以及其他活动产生的污水直接进入河流。从分析结果可以看出,古夫河河流水质受自然和人类因素的影响而发生了变化,综合来看,下游变化更大,受人为干扰的影响更甚。

此次研究在空间尺度上设立了多个定位监测点,在时间尺度上对古夫河水质进行了为期一年的月监测,对河流水质指标进行多元统计分析,初步探讨了古夫河水质时空分异特征,研究结果表明河流表现出季节性和区域性动态变化特征。但是,本文仅局限在对古夫河年内时空分异特征进行研究。水质受多方面的自然因素和人为因素的影响而处于不断的时空变化中,具有复杂性和不确定性,如果能跟踪获得 2—3a 以上的水质监测数据,进行较长时间序列分析,则更能准确把握水质的时空变化特征,为水资源的管理决策者提供更为科学可靠的结论。因此,对三峡库区古夫河河流水质进行长时间序列的追踪研究显得尤为迫切。

致谢:中国科学院水生生物研究所李凤清博士、中国地质大学(武汉)李建峰、潘晓颖、姚敏敏、田幸、谷金普、唐佳、曾露、王自业等参加采样,中国地质大学(武汉)程丹丹博士帮助写作,特此致谢。

References:

- [1] Wu J G, Huang J H, Han X G, Xie Z Q, Gao X M. Three-Gorges Dam-experiment in habitat fragmentation. *Science*, 2003, 300 (5623): 1239-1240.
- [2] Cai Q H, Hu Z Y. Studies on eutrophication problem and control strategy in the Three Gorges Reservoir. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, 30 (1): 7-11.
- [3] Song L X, Liu D F, Xiao S B. Experimental study on nonpoint source nutrient output from Xiangxi Basin in Three Gorges Reservoir. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(8): 990-996.
- [4] Qiu G S, Hu S, Ye D, Yuan L, Zang X P. Investigation on the present situation of eutrophication and water bloom in the branches of Three Gorges Reservoir. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(3): 311-316.
- [5] Wang H Y. Effects of the Three Gorges Reservoir on the water environment of the Xiangxi River with the proposal of countermeasures. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, 14(2): 233-238.
- [6] Cullaj A, Hasko A, Miho A, Schanz F, Brandl H, Bachofen R. The quality of Albanian natural waters and the human impact. *Environment International*, 2005, 31(1): 133-146.
- [7] Alberto W D, Del Pilar D M, Valeria A M, Fabiana P S, Cecilia H A, de los Angeles B M. Pattern recognition techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality. A case study: Suquia River Basin (Cordoba-Argentina). *Water Research*, 2001, 35(12):

2881-2894.

- [8] Varol M, Gökot B, Bekleyen A, Şen B. Spatial and temporal variations in surface water quality of the dam reservoirs in the Tigris River Basin, Turkey. *Catena*, 2012, 92: 11-21.
- [9] Juahir H, Zain S M, Yusoff M K, Hanidza T I T, Armi A S M, Toriman M E, Mokhtar M. Spatial water quality assessment of Langat River Basin (Malaysia) using environmetric techniques. *Environmental Monitoring Assessment*, 2011, 173(1/4): 625-641.
- [10] Zhao G J, Gao J F, Tian P, Tian K, Ni G H. Spatial-temporal characteristics of surface water quality in the Taihu Basin, China. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 64(3): 809-819.
- [11] Kannel P R, Lee S, Kanel S R, Khan S P, Lee Y. Spatial-temporal variation and comparative assessment of water qualities of urban river system: a case study of the river Bagmati (Nepal). *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, 129(1/3): 433-459.
- [12] Qadir A, Malik R N, Husain S Z. Spatio-temporal variations in water quality of Nullah Aik-tributary of the river Chenab, Pakistan. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, 140(1/3): 43-59.
- [13] Mendiguchia C, Moreno C, Galindo-Riano M D, Garcia-Vargas M. Using chemometric tools to assess anthropogenic effects in river water-a case study: Guadalquivir River (Spain). *Analytica Chimica Acta*, 2004, 515(1): 143-149.
- [14] Singh K P, Malik A, Sinha S. Water quality assessment and apportionment of pollution sources of Gomti river (India) using multivariate statistical techniques-a case study. *Analytica Chimica Acta*, 2005, 538(1/2): 355-374.
- [15] Jiang M X, Deng H B, Tang T, Cai Q H. On spatial pattern of species richness in plant communities along riparian zone in Xiangxi River Watershed. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(5): 629-635.
- [16] Huang J L, Ho M H, Du P F. Assessment of temporal and spatial variation of coastal water quality and source identification along Macau peninsula. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2011, 25(3): 353-361.
- [17] Xiong H, Yu Z G, Chen H T, Zhang J. Geochemistry of dissolved phosphate and silicon in Yalujiang estuary. *Marine Environmental Science*, 1999, 18(2): 1-5.
- [18] Li F Q, Ye L, Liu R Q, Cao M, Cai Q H. Investigation on aquatic environmental factors in Xiangxi River Watershed. *Ecological Science*, 2007, 26(3): 199-207.
- [19] Smetacek V. Biological oceanography: diatoms and the silicate factor. *Nature*, 1998, 391(6664): 224-225.
- [20] Shi Y H, Wang D, Pan L, Cheng Y, Zhu S B, Deng Z M, Wang J F. Relation ship between rainfall change and surface runoff in typical small valley of Reservoir Area of Three Gorges. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(3): 118-120.
- [21] Sun Z B, Chen Z J, Liao X Y, Wang H M. Characteristics of agricultural non-point source nitrogen and phosphorus losses in a typical small watershed in Three Georges Reservoir area. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(8): 1720-1725.
- [22] Hill W R, Mulholland P J, Marzolf E R. Stream ecosystem responses to forest leaf emergence in spring. *Ecology*, 2001, 82(8): 2306-2319.
- [23] Jacobs T C, Gilliam J W. Riparian losses of nitrate from agricultural drainage waters. *Journal of Environmental Quality*, 1985, 14(4): 472-478.
- [24] Van Herpe Y, Troch P A. Spatial and temporal variations in surface water nitrate concentrations in a mixed land use catchment under humid temperate climatic conditions. *Hydrological Processes*, 2000, 14(14): 2439-2455.
- [25] Chen J J. Analysis of water quality of main into-lake rivers in Dianchi Lake. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2005, 20(4): 569-572.
- [26] Zhang S Y, Feng M L, Lin S, Tan D F, Hu R G, Yang X W, Jiang C. Dissolved silicon, inorganic nitrogen and phosphorus in the stream water of two small watersheds in Three Gorges Area. *Environmental Science*, 2008, 29(10): 2716-2722.
- [27] Shen Z L. Preliminary study on the Changjiang River mainstream nutrients fluxes. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 1997, 28(5): 522-528.
- [28] Varol M, Şen B. Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: a case study of Behrimaz Stream, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, 159(1/4): 543-553.
- [29] Leland H V. Distribution of phytobenthos in the Yakima River Basin, Washington, in relation to geology, land-use, and other environment-factors (review). *Canadian Journal Fisheries Aquatic Sciences*, 1995, 52(5): 1108-1129.
- [30] Zhou C J, Dong S C, Wang G. Resources characteristics of the major rivers in the source areas of the Changjiang, Huanghe and Lancangjiang. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(6): 493-498.
- [31] Pekey H, Karakaş D, Bakoglu M. Source apportionment of trace metals in surface waters of a polluted stream using multivariate statistical analyses. *Marine Pollution Bulletin*, 2004, 49(9/10): 809-818.
- [32] Holloway J M, Dahlgren R A, Hansen B, Casey W H. Contribution of bedrock nitrogen to high nitrate concentrations in stream water. *Nature*, 1998, 395(6704): 785-788.
- [33] Ye L, Xu Y Y, Cai Q H. The spatial and temporal distribution of nitrate and phosphate in the Xiangxi Bay, Three Gorge Reservoir region during the spring bloom period. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, 30(1): 75-79.
- [34] Day J A, Dallas H F, Wackernagel A. Delineation of management regions for South African rivers based on water chemistry. *Aquatic Ecosystem*

- Health and Management, 1998, 1(2): 183-197.
- [35] Wang S H, Jiang X, Jin X C. Spatial-temporal variations of aquatic environmental factors and their influences to algal blooming in Lake Chaohu. *Journal of Lake Sciences*, 2011, 23(6): 873-880.
- [36] Wang X Y, Wang X F, Wang Q P, Wang Z G, Cai X G. Loss of non-point source pollutants from Shixia Small Watershed, Miyun Reservoir, Beijing. *Scientia Geographica Sinica*, 2004, 24(2): 227-231.
- [37] Liu D M, Zhang L J. Temporal and spatial distributions of organic carbon in the Huanghe (Yellow) River. *Periodical of Ocean University of China*, 2010, 40(12): 105-110.
- [38] Tang F, Qian Y Q. Researching the relationship between TOC and CODMn of Chaohu Lake water. *Chongqing Environmental Science*, 2001, 23(4): 48-50.
- [39] Parks S J, Baker L A. Sources and transport of organic carbon in an Arizona river-reservoir system. *Water Research*, 1997, 31(7): 1751-1759.
- [40] Walker C E, Pan Y D. Using diatom assemblages to assess urban stream conditions. *Hydrobiologia*, 2006, 561(1): 179-189.
- [41] Zhang S T, Xue J Z, Yao J L, Wu H X. Temporal and spatial variation of water environment in Daning Bay of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Hydroecology*, 2010, 3(2): 1-8.

参考文献:

- [2] 蔡庆华, 胡征宇. 三峡水库富营养化问题与对策研究. *水生生物学报*, 2006, 30(1): 7-11.
- [3] 宋林旭, 刘德富, 肖尚斌. 三峡库区香溪河流域非点源营养盐输出变化的试验研究. *长江流域资源与环境*, 2011, 20(8): 990-996.
- [4] 邱光胜, 胡圣, 叶丹, 袁琳, 臧小平. 三峡库区支流富营养化及水华现状研究. *长江流域资源与环境*, 2011, 20(3): 311-316.
- [5] 王海云. 三峡水库蓄水对香溪河水环境的影响及对策研究. *长江流域资源与环境*, 2005, 14(2): 233-237.
- [15] 江明喜, 邓红兵, 唐涛, 蔡庆华. 香溪河流域河岸带植物群落物种丰富度格局. *生态学报*, 2002, 22(5): 629-635.
- [17] 熊辉, 于志刚, 陈洪涛, 张经. 鸭绿江口溶解态 P、Si 的地球化学研究. *海洋环境科学*, 1999, 18(2): 1-5.
- [18] 李凤清, 叶麟, 刘瑞秋, 曹明, 蔡庆华. 香溪河流域水体环境因子研究. *生态科学*, 2007, 26(3): 199-207.
- [20] 史玉虎, 王栋, 潘磊, 程云, 朱仕豹, 邓中美, 王杰锋. 三峡库区典型流域降雨变化与径流的关系研究. *水土保持学报*, 2003, 17(3): 118-120.
- [21] 孙正宝, 陈治谏, 廖晓勇, 王海明. 三峡库区典型小流域农业非点源氮磷流失特征. *生态学杂志*, 2011, 30(8): 1720-1725.
- [25] 陈建军. 滇池主要入湖河流水质分析. *云南农业大学学报*, 2005, 20(4): 569-572.
- [26] 张少源, 冯明磊, 林杉, 覃德富, 胡荣桂, 杨小文, 姜诚. 三峡库区小流域河流可溶性硅、无机氮和磷的研究. *环境科学*, 2008, 29(10): 2716-2722.
- [27] 沈志良. 长江干流营养盐通量的初步研究. *海洋与湖沼*, 1997, 28(5): 522-528.
- [30] 周长进, 董锁成, 王国. “三江”河源地区主要河流的水资源特征. *自然资源学报*, 2001, 16(6): 493-498.
- [33] 叶麟, 徐耀阳, 蔡庆华. 香溪水库湾春季水华期间硝酸盐、磷酸盐的时空分布. *水生生物学报*, 2006, 30(1): 75-79.
- [35] 王书航, 姜霞, 金相灿. 巢湖水环境因子的时空变化及对水华发生的影响. *湖泊科学*, 2011, 26(6): 873-880.
- [36] 王晓燕, 王晓峰, 汪清平, 王振刚, 蔡新广. 北京密云水库小流域非点源污染负荷估算. *地理科学*, 2004, 24(2): 227-231.
- [37] 刘冬梅, 张龙军. 黄河干流有机碳的时空分布特征. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2010, 40(12): 105-110.
- [38] 汤峰, 钱益群. 巢湖水总有机碳(TOC)——高锰酸钾指数(CODMn)相关性研究. *重庆环境科学*, 2001, 23(4): 64-66.
- [41] 张述太, 薛俊增, 姚建良, 吴惠仙. 三峡水库大宁河库湾水环境的时空变化特征. *水生态学杂志*, 2010, 3(2): 1-8.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 17 Sep., 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- The overview and prospect of chemical composition of plant cuticular wax ZENG Qiong, LIU Dechun, LIU Yong (5133)
- Research progresses in carbon budget and carbon cycle of the coastal salt marshes in China
..... CAO Lei, SONG Jinming, LI Xuegang, et al (5141)

Autecology & Fundamentals

- Effects of straw interlayer on soil water and salt movement and sunflower photosynthetic characteristics in saline-alkali soils
..... ZHAO Yonggan, PANG Huancheng, LI Yuyi, et al (5153)
- Adaptations of dimorphic seeds and seedlings of *Suaeda salsa* to saline environments
..... LIU Yan, ZHOU Jiachao, ZHANG Xiaodong, et al (5162)
- Responses of root morphology of peanut varieties differing in drought tolerance to water-deficient stress
..... DING Hong, ZHANG Zhimeng, DAI Liangxiang, et al (5169)
- The relationship between physiological indexes of apple cultivars and resistance to *Eriosoma lanigerum* in summer
..... WANG Xicun, ZHOU Hongxu, YU Yi, et al (5177)
- Physiological responses of *Salicornia bigelovii* to salt stress during the flowering stage
..... LIU Weicheng, ZHENG Chunfang, CHEN Chen, et al (5184)
- Biological characteristics and cultivation of fruit body of wild medicinal mushroom *Perenniporia fraxinea*
..... LU Tie, BAU Tolgor (5194)
- The study of characteristics of soil microbial communities at high severity burned forest sites for the Great Xingan Mountains: an
example of slope and aspect BAI Aiqin, FU Bojie, QU Laiye, et al (5201)
- Effect of different fertilizer combinations and straw return on microbial biomass and nitrogen-fixing bacteria community in a paddy
soil LIU Xiaoqian, TU Shihua, SUN Xifa, et al (5210)
- Structural characters and nutrient contents of leaves as well as nitrogen distribution among different organs of big-headed wheat
..... WANG Lifang, WANG Dexuan, SHANGGUAN Zhouping (5219)
- Effects of EP-1 on spatial memory and anxiety in *Mus musculus* WANG Xiaojia, QIN Tingting, HU Xia, et al (5228)

Population, Community and Ecosystem

- Gap characteristics in the mixed broad-leaved Korean pine forest in Xiaoxing'an Mountains
..... LIU Shaochong, WANG Jinghua, DUAN Wenbiao, et al (5234)
- Soil nitrogen and phosphorus stoichiometry in a degradation series of *Kobresia humilis* meadows in the Tibetan Plateau
..... LIN Li, LI Yikang, ZHANG Fawei, DU Yangong, et al (5245)
- An analysis of carbon flux partition differences of a mid-subtropical planted coniferous forest in southeastern China
..... HUANG Kun, WANG Shaoqiang, WANG Huimin, et al (5252)
- The niche of annual mixed-seeding meadow in response to density in alpine region of the Qilian Mountain, China
..... ZHAO Chengzhang, ZHANG Jing, SHENG Yaping (5266)
- Functional feeding groups of macrozoobenthos from coastal water off Rushan PENG Songyao, LI Xinzhen (5274)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Effects of selective cutting on vegetation carbon storage of boreal *Larix gmelinii*-*Carex schmidtii* forested wetlands in Daxing'anling,
China MU Changcheng, LU Huicui, BAO Xu, et al (5286)
- CO₂ flux in the upland field with corn-rape seed rotation in the karst area of southwest China
..... FANG Bin, LI Xinqing, CHENG Jianzhong, et al (5299)
- Monitoring spatial variability of soil salinity in dry and wet seasons in the North Tarim Basin using remote sensing and electromagn-
etic induction instruments YAO Yuan, DING Jianli, LEI Lei, et al (5308)
- Methane and nitrous oxide fluxes in temperate secondary forest and larch plantation in Northeastern China
..... SUN Hailong, ZHANG Yandong, WU Shiyi (5320)
- Butterfly diversity and vertical distribution in eastern Tianshan Mountain in Xinjiang
..... ZHANG Xin, HU Hongying, LÜ Zhaozhi (5329)

- Dynamics of aerodynamic parameters over a rainfed maize agroecosystem and their relationships with controlling factors CAI Fu, ZHOU Guangsheng, MING Huiqing, et al (5339)
- The response process to extreme climate events of the household compound system in the northern slope of Tianshan Mountain LI Xiliang, HOU Xiangyang, DING Yong, et al (5353)
- Analysis on spatial-temporal heterogeneities of landscape fragmentation in urban fringe area; a case study in Shunyi district of Beijing LI Can, ZHANG Fengrong, ZHU Taifeng, et al (5363)
- Resource and Industrial Ecology**
- CPUE Standardization of *Illex argentinus* for Chinese Mainland squid-jigging fishery based on generalized linear Bayesian models LU Huajie, CHEN Xinjun, CAO Jie (5375)
- Spatial-temporal differentiation of water quality in Gufu River of Three Gorges Reservoir RAN Guihua, GE Jiwen, MIAO Wenjie, et al (5385)
- Urban, Rural and Social Ecology**
- Comparison environmental impact of the peasant household in han, zang and hui nationality region; case of zhangye, Gannan and Linxia in Gansu Province ZHAO Xueyan, MAO Xiaowen (5397)
- Research Notes**
- The seasonal variation and community structure of zooplankton in China sea DU Mingmin, LIU Zhensheng, WANG Chunsheng, et al (5407)
- Immunotoxicity of marine pollutants on the clam *Ruditapes philippinarum* DING Jianfeng, YAN Xiwu, ZHAO Liqiang, et al (5419)
- Influence of submerged macrophytes on phosphorus transference between sediment and overlying water in decomposition period WANG Lizhi, WANG Guoxiang (5426)
- Distribution patterns of alien herbs in the Yiluo River basin GUO Yili, DING Shengyan, SU Si, et al (5438)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的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;新书评价和学术、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

本期责任副主编 张利权

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)

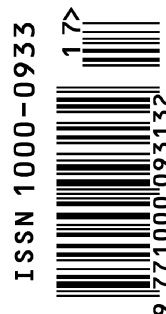
第 33 卷 第 17 期 (2013 年 9 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 17 (September, 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