

太湖源林区水系源头水质时空变异与原因探析

徐涌, 叶正钱, 姜培坤, 周国模, 吴家森, 姚芳

(浙江林学院 环境科技学院, 浙江 临安 311300)

摘要: 位于浙江省临安市太湖源镇的太湖源水系属太湖流域苕溪水的主要水源地, 其水质变化关系到下游杭嘉湖平原和江苏省太湖周边地区众多人口的饮用水水质安全和生活用水质量。雷竹 *Phyllostachys praecox* 林地雷竹笋生产和森林旅游是太湖源镇的两大支柱产业。为监测当地水源水质和探明水质变化原因, 对太湖源水系水质时空变化、成因及水质变化状况进行了研究, 对水体中氮、磷及有机物质量浓度逐月进行测定分析。结果表明, 源头水与其下游水之间水质随空间分布差异巨大; 水中氮为严重污染物, 其次为有机物。水中的铵态氮、高锰酸盐指数、可溶性有机碳和总磷等也因季节变化有较大波动。水质变化与当地雷竹笋生产和森林旅游及城镇居民生活废弃物排放等密切相关。图 2 表 2 参 12

关键词: 水资源; 水质; 竹林; 森林旅游; 氮; 太湖流域

中图分类号: S7-05; X522

文献标志码: A

文章编号: 1000-5692(2009)05-0607-06

Spatio-temporal variations and cause analysis of headwater quality in forest area of Taihuyuan

XU Yong, YE Zheng-qian, JIANG Pei-kun, ZHOU Guo-mo, WU Jia-sen, YAO Fang

(School of Environmental Science and Technology, Zhejiang Forestry College, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: The headwaters of Tiaoxi River, located in Taihu Headwaters (THH) Township of Lin'an City, Zhejiang Province, serve as a source of drinking water for people living in the Tiaoxi River watershed area comprised of Hang-Jia-Hu Plain in northern Zhejiang Province and a region along Taihu Lake in Jiangsu Province. Maintenance with high water quality to the headstreams therefore is of great importance. In recent years, however, with the fast development of heavily fertilized bamboo plantations for edible bamboo shoots and flourishing forest tourism, soil runoff and waste output due to improper deposition and discharge have imposed remarkable risk of water pollution. Protection of the headwater quality in the catchment of THH Township has become more serious than ever. This research project is therefore carried out to monitor water quality of the headwaters down to the lower part of the Tiaoxi River in metropolitan area of Lin'an City; sources of pollutants are also under investigation. The present paper summarizes our primary results based on monthly water monitoring from May 2006 until March 2007. The results show that water quality varies greatly over the distance from the headwaters to the lower part. Nitrogen (N) is the most serious pollutant. Concentrations of ammonium, organic matter (OM) and phosphorus (P) in the water also change remarkably over time. The results imply that water pollution is closely related to output of organic wastes including household refuse and human waste where tourism is heavily increasing in the headwaters areas. Additionally, the pollution is heavy in the metropolitan area of Lin'an City and the area of bamboo plantations. [Ch, 2 fig. 2 tab. 12 ref.]

收稿日期: 2009-02-19; 修回日期: 2009-04-08

基金项目: 浙江省科学技术重大项目(2005C12032)

作者简介: 徐涌, 讲师, 硕士, 从事农业资源利用与植物营养研究。E-mail: xuyong@zjfc.edu.cn。通信作者: 周国模, 教授, 博士, 从事森林资源与环境管理研究。E-mail: zhougm@zjfc.edu.cn

Key words: water resources; water quality; bamboo plantation; forest tourism; nitrogen; Taihu Region

水资源是保障人类生存和社会经济持续发展的重要基础自然资源。因地区差别,一方面中国水资源分布不均匀,许多地方水资源数量不足^[1];另一方面由于水极易受到污染,随着社会经济的快速发展,对自然资源开发利用的加剧,某些地方还发生水质型缺水,中国水资源污染问题已经极为严峻^[2]。在水源保护地区,也可以由于对水源地的保护及利用不当,诸如过量施肥和水土流失,水源区生活、生产废弃物排放等因素,致使污染物进入水系源头地表水中,导致饮用水水质下降甚至恶化^[3-4]。近年来,随着人民生活水平的提高,户外休闲,特别是到风景名胜区的森林旅游活动增加,而众多的风景名胜区位于森林保护区内,这些地方也是重要的水源保护区。随着位于水源地区的森林旅游业的兴起和快速发展,其他相应的二、三产业如土特产加工成休闲食品和纪念品以及各类餐饮业、旅馆等也随之迅速发展。这些行业的生产、生活废弃物,若处置不当,会给周边水质及下游地区饮水安全带来极为严重的后果。因此,如何减少污水对水源的污染,保护及合理利用有限的水资源已经是当务之急。而开展水资源保护及合理利用,首先必须开展水质监测,探明水源水质现状及其时空变化特点。太湖源是临安市重要的风景旅游和休闲胜地,每年吸引了众多游客前来休闲度假,森林旅游业是太湖源镇的主要产业之一。雷竹 *Phyllostachys praecox* 笋生产则是太湖源镇也是临安市的支柱产业之一,雷竹笋是知名的蔬菜,它也被用来加工成笋罐头食品以及笋干等休闲食品。由于森林旅游和雷竹笋生产都是太湖源镇主要的支柱产业,又位于太湖源头地区,因此,若不当经营和生产可能会对水源水质造成严重危害。位于浙江省临安市太湖源镇的太湖源水系属太湖流域苕溪水的主要水源地,其水质变化关系到杭嘉湖平原和江苏省太湖周边地区众多人口的生活用水安全。开展太湖源水系水质时空动态监测对探明水质变化及其原因,保障水源质量具有重大意义。

1 研究区域及研究方法

1.1 研究区域与采样位置

研究区域主要位于浙江省临安市太湖源镇境内,水系为东苕溪主源的南苕溪。该水系发源于天目山南麓浙江省临安市临目马尖岗,自西向东流经临安横溪、锦城、青山和杭州余杭区等地后折向北去到杭州瓶窑,在瓶窑附近接纳中苕溪、北苕溪之水,汇成东苕溪。南苕溪主流长 76 km,流域面积 1 420 km²。监测区域为南苕溪的上、中游(图 1),西起东天目山,东至青山湖。按照《GB/T 12997-1991 水质采样方案设计技术规定》设置监测断面,进行动态监测。L1 位于研究段河流上游的龙须沟, L2 位于里畈水库, L3 位于横溪, L4 位于太湖源镇(青云镇)农贸市场附近, L5 位于青云镇浪口处, L6 位于锦城城区出口。该区源头龙须沟—里畈水库一线(简称龙须山线)系处自然保护区,为地形较陡的山林区,是饮用水水源地,人为的农林业生产活动少,以发展森林旅游业为主,“农家乐”饭店较多,主要污染源为生活废弃物和自然状态下的水土流失。源头天目山—横溪—青云镇一线(简称东天目山线)地势相对平坦,人口密度较大,分布着大片的雷竹林地,是雷竹笋生



图 1 监测断面示意图

Figure 1 Sketch of monitoring sections

产的主要基地，也分布着一些工业企业。龙须山线和东天目山线水系汇集于浪口后，穿越锦城城区注入青山湖。

1.2 材料与方法

从 2006 年 5 月起，每月采样，取监测断面表层水(离水面 20 ~ 30 cm)，用聚乙烯瓶装运回实验室，当天进行分析测定。总氮(TN)用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB/T 11894 - 1989)，铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)用水杨酸分光光度法(GB/T 7481 - 1987)，总磷(TP)用钼酸铵分光光度法(GB/T 11893 - 1989)，可溶性有机碳(DOC)用燃烧氧化-非分散红外吸收法(HJ/T 71-2001)，高锰酸盐指数(COD_{Mn})用酸性法(GB/T 11892 - 1989)，钙、氯、钾、镁、钠离子用离子色谱法^[5]。

2 结果与分析

2.1 研究区域水质随地域空间变化特点

水质分析表明，水系水质从没有村庄、纯自然林植被地段的源头一旦经过村庄、集镇或农林业生产区，水质即发生显著变化。表 1 给出了各个监测断面河流水中总氮、铵态氮、总磷、可溶性有机碳和高锰酸盐指数的平均质量浓度(2006 年 5 月至 2007 年 3 月)。由表 1 可知，水流从源头流向下游地区过程中，无论是龙须山线，还是东天目山线，水中总磷质量浓度呈上升趋势，但总体上较低，仅在人口密集的临安市区段有显著提高，按《GB 3838 - 2002 地表水环境质量标准》，从 I 类水降为 III 类水。由此可以推断，除了上、中游地区的生活、生产活动增加水流中总磷外，大量人口集中生活带来的废弃物是水中磷的主要来源。由于钠主要来自生活废弃物，而生活废弃物中最主要的固体成分为有机质碳，结合总磷与其他成分的相关分析(表 2)，发现总磷与有机物指标高锰酸盐指数和离子的相关性高，进一步表明该区域水中磷主要来源于生活废弃物。

从总氮的情况来看，研究区域水体中质量浓度普遍较高，且极易受人为活动的污染，尤其受雷竹林地的农事生产活动影响，水质以雷竹林地区最差(横溪、青云一带)，平均质量浓度在 $4.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上。这与雷竹林地大量施用化肥和有机肥，进行挖笋松土等密切相关^[6]。龙须山线从龙须沟至里畈水库区域属重点水源保护区，生产经营活动受到严格规定和限制，农林业生产(规模种植业、养殖业)的发展很有限。该区域森林旅游业发达，尤其是餐饮、住宿的生活废弃物中往往含氮较高，成为重要的水体氮源，使得水体中总氮质量浓度也接近 $2.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。此外，该区域内农户零星放养鸡、鸭等，其粪便直接留在地势较陡的林地表面，是否为不可忽视的氮源，也需深入研究。

研究区域水体中铵态氮质量浓度较低，除锦城出口处外，铵态氮占总氮的比例很小(5%以下)。铵态氮与总磷、钠呈极显著相关，却与总氮相关性很低。从其质量浓度变化来分析，虽然在经过雷竹林地区未有增加，但是在经过人口集中的锦城城区时，水体中铵态氮增加极为显著，从上游平均不足 $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 提高到 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上。从其质量浓度显著升高现象来分析，很可能因为土壤对 NH_4^+ 的

表 1 不同监测断面各水质指标平均值

Table 1 Average values of water quality indexes for different monitoring sections

监测断面	水质指标/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)				
	总氮	铵态氮	总磷	可溶性有机碳	高锰酸盐指数
龙须沟(L1)	1.75	0.086 3	0.014 5	4.99	1.50
里畈水库(L2)	1.92	0.058 8	0.021 2	5.36	1.37
横溪(L3)	5.78	0.060 1	0.062 3	23.79	2.72
青云镇农贸市场(L4)	4.04	0.058 9	0.039 3	16.20	2.94
青云镇浪口(L5)	4.26	0.081 6	0.042 7	16.50	3.09
锦城镇(L6)	3.38	0.569 0	0.170 0	21.10	4.16

说明：监测时间为 2006 年 5 月至 2007 年 3 月。

表 2 水质指标间的相关性分析

Table 2 Correlations analysis for water quality indexes

	TP	TN	NH ₄ ⁺ -N	DOC	COD _{Mn}	Ca ²⁺	Cl ⁻	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
TP	1									
TN	0.25	1								
NH ₄ ⁺ -N	0.947**	-0.065	1							
DOC	0.668	0.886**	0.403	1						
COD _{Mn}	0.846*	0.562	0.707	0.842*	1					
Ca ²⁺	0.367	0.980**	0.064	0.931**	0.694	1				
Cl ⁻	0.712	0.842*	0.469	0.988**	0.909**	0.908**	1			
K ⁺	0.892*	0.613	0.728	0.898**	0.981**	0.724	0.941**	1		
Mg ²⁺	0.387	0.919**	0.112	0.896**	0.770*	0.973**	0.907**	0.759*	1	
Na ⁺	0.953**	0.242	0.914**	0.643	0.923**	0.391	0.725	0.913**	0.475	1

说明: **表示 $P < 0.01$; *表示 $P < 0.05$ 。TP 总磷; TN 总氮; NH₄⁺-N 铵态氮; DOC 可溶性有机碳; COD_{Mn} 高锰酸盐指数; Ca²⁺ 钙离子; Cl⁻ 氯离子; K⁺ 钾离子; Mg²⁺ 镁离子; Na⁺ 钠离子。

吸附能力强,因而水流经过雷竹林地区铵态氮增加较小。而在人口集中生活区水中铵态氮的显著提高,提示部分腐烂的生活废弃物或人粪尿等排泄物,经过某些途径进入了河道^[7]。从总氮与总磷相关性差(表 2)可知,水体中氮和磷主要污染源成分的来源不同。磷主要来源于生活废弃物,氮除了来自于生活废弃物外,更多源自于雷竹林地的水土流失。

虽然河流中可溶性有机碳可以由源头地区植物的枯枝落叶随腐解和水土流失进入水体,但由表 1 可见,它们对龙须山线上监测断面水中可溶性有机碳质量浓度的贡献很有限。而从东天目山线横溪(23.79 mg·L⁻¹)至青云浪口(16.50 mg·L⁻¹)可溶性有机碳质量浓度相对较高的情况来看,结合该线周边地区的生产生活情况,及可溶性有机碳与总氮的显著相关性,判断雷竹林地对可溶性有机碳起着重要影响。此外,研究区水体高锰酸盐指数值较低,按《GB 3838 - 2002 地表水环境质量标准》,除锦城城区外皆属 I, II 类水质。高锰酸盐指数是传统的反映水体有机污染状况的指标,通过对比可溶性有机碳和高锰酸盐指数,说明水体有机污染成分中有很多是高锰酸盐难以氧化的,这部分有机物很可能是由工业污染带来的或是农林业生产中的有机农药等残留随水土流失进入河道。由上述分析可知,源头洁净的水流随着周边人类活动的增加,尤其是雷竹林地生产和集镇居民生活,水质发生了巨大的变化。

2.2 研究区域水质随季节变化特点

在空间分布上,研究区水系从源头经上游村庄至中下游地区,水质发生了巨大变化。在时间上,同一水流断面上的水质也因季节变化发生波动(图 2)。各监测指标的季节性波动变幅与各地段水质好坏相关,水质好的地段(龙须沟、里畈水库)波动小,水质差的地段变幅大。从监测数据来看,总氮在 5 月质量浓度最高。虽然这个月降水几率大于其他时间,但大雨、暴雨几率小,雨水造成的地表径流所携带土壤固体颗粒量小,因此,降水可能会对污染物起到稀释作用。但是监测结果却相反,这与 5 月当地旅游旺季游客消费增加有关,也与当地的特色生产情况有关。太湖源镇丘陵地区,农林业生产发达,尤其是雷竹林地遍布,而此时雷竹出笋尚未结束,因而地表受挖笋的扰动剧烈,加上气温升高快,竹林地有机物分解加快^[8],因此,这个时期降水就可以携带大量的水溶态氮以地表径流、地下侧渗等方式进入周边水体,从而导致水中总氮增高。而由于土壤对铵态氮和磷的吸附固定能力强^[9-11],所以这一地带水中的铵态氮和总磷变幅小。

而在人口居住密集的锦城城区段水体中,各监测参数的季节性变幅巨大,除气候因素尤其是降水对水中污染物质量浓度的影响之外,其上游地区的工农业生产、市区的生产生活废弃物等进入水体的污染物数量变化对水质的季节性影响产生了重要作用。前文指出,铵态氮和总磷与生活废弃物或人粪

尿等排泄物更为密切相关,表 2 的相关分析又表明铵态氮和总磷极显著相关,图 2 同样显示了铵态氮和总磷变化趋势的一致性。由于 6 月和 7 月气温升高快,进入夏季人均食物日消费水平提高,生活废弃物、排泄物量大,而这些皆为氮和磷质量浓度高、易分解的有机污染源。它们经部分降解,进入周边水体,就会致水中铵态氮和总磷提高。但从图 2 发现,几个监测断面上的总磷质量浓度在 6-7 月却有所下降,这主要是因为在此期间当地的降水增多,而源头地区河流流量往往不大,因此,降水带来的稀释效应使得总磷质量浓度降低。

分析水中可溶性有机碳和高锰酸盐指数的变化,图 2 显示它们两者变化不一致,尤其是在锦城区段水中,表明水中有机污染物构成在不同季节有变化。此外,该区段 5-7 月水中可溶性有机碳变化幅度较小,而高锰酸盐指数却变幅较大,以 6-7 月尤其是 6 月的高锰酸盐指数高,提示除了市区废弃物直接影响外,来自上游水系的污染物对下游水质的重要影响。分析可溶性有机碳在各区段的质量浓度,横溪段水体中可溶性有机碳高于其他各处,该处雷竹林遍布,除了对下游水中可溶性有机碳质量浓度产生影响外,下游可溶性有机碳的成分构成更为其所左右^[12]。

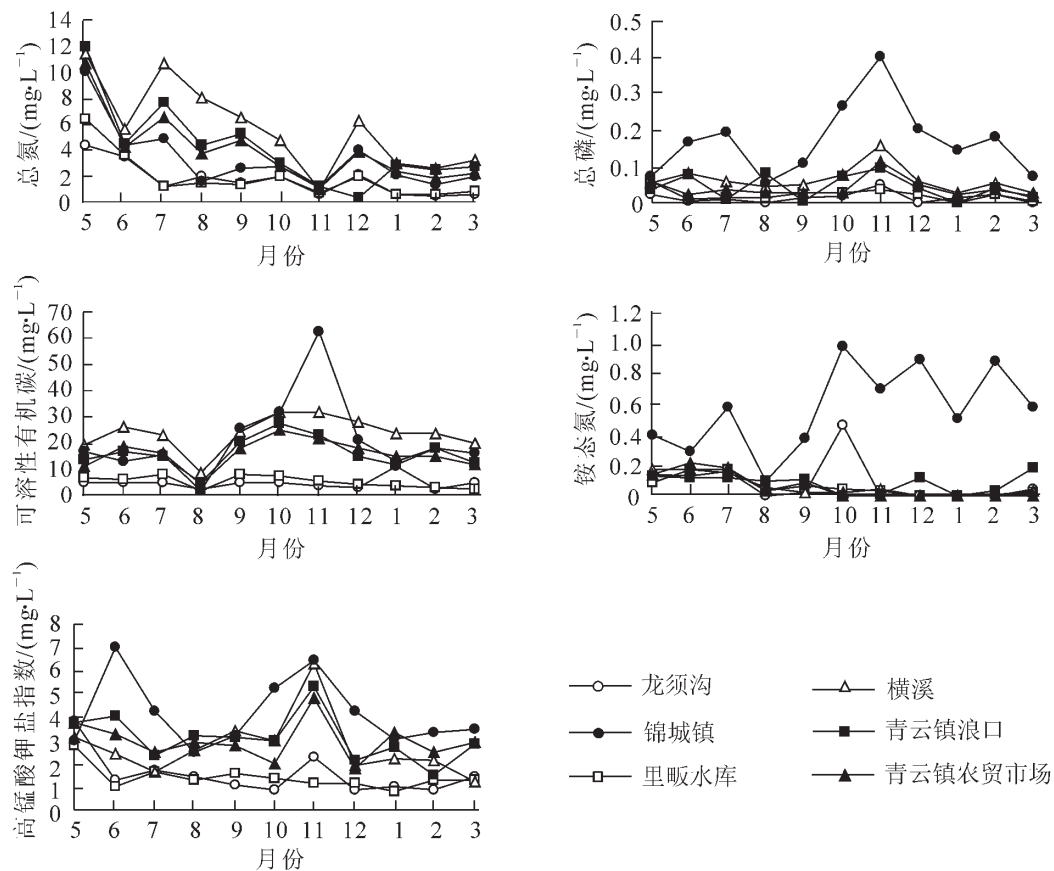


图 2 不同监测断面各水质指标的时间变异

Figure 2 Temporal variations of water quality indexes for different monitoring sections

3 结论与讨论

研究区水体质量空间差异巨大。表现为龙须山线水体周边人口密度低,土地利用上以非集约化的经济林栽培为主,有些区段则保持着全自然植被状态,附近也少有工矿企业运作,因此该区域水体中除总氮外的多项水质指标值常年较低,达到地表水Ⅰ、Ⅱ类水质标准。在东天目山线水体周边人口密度增大,土地利用上以雷竹林集约化经营为主,且种植区与河道相距较短,林地径流极易流入水体,进入青云镇后,水体又受到城市工业、生活污水的影响,因此该区域水体中各项水质指标均显著升高。

无论在龙须山线, 还是东天目山线, 水体中氮质量浓度普遍较高, 故氮为研究区水系的主要污染因子。这一现象与监测区水体周边农林业经营, 特别是当地雷竹林集约化经营密切相关。另外, 研究区内的“农家乐”饭店、旅店及未经处理的农村废弃物肆意堆放也是水体中氮质量浓度升高的重要原因。

水体质量的时间变异受当地农事活动安排、降水量的季节性分布、森林旅游的淡旺季和居民消费水平与规律等诸多因素影响明显。

近年来, 随着河流周边工矿企业等点源污染逐渐得到控制, 水系源头地区, 即山林区农村的面源式污染越来越成为影响河流水质的主要原因。然而这些面源污染的具体类别、分布、影响程度在不同地区又千差万别, 使得防治工作也更加困难。本文所研究区域就存在着以下特点: ①集约林地的过量施肥与水土流失普遍; ②农村家庭生活污水和家庭畜禽养殖废弃物无序排放; ③森林旅游业“农家乐”饭店生活污水无序排放。对此, 一方面需要进行水系水质时空变化的长期监测, 另一方面也需要对污染物的构成、数量作更深入的调查, 以便对水质变化作出科学预警, 保障流域水质安全。

参考文献:

- [1] 阳书敏, 邵东国, 沈新平. 南方季节性缺水河流生态环境需水量计算方法[J]. 水利学报, 2005, **36** (11): 1341 - 1346.
YANG Shumin, SHAO Dongguo, SHEN Xinping. Quantitative approach for calculating ecological water requirement of seasonal water-deficient rivers [J]. *J Hydraul Eng*, 2005, **36** (11): 1341 - 1346.
- [2] 方云英, 杨肖娥, 濮培民, 等. 宁波力洋水库富营养化现状及生态治理对策[J]. 水土保持学报, 2004, **18** (6): 183 - 186.
FANG Yunying, YANG Xiaoe, PU Peimin, et al. Eutrophication and countermeasures of ecological management in Liyang Reservoir [J]. *J Soil Water Conserv*, 2004, **18** (6): 183 - 186.
- [3] JARVIE H P, WITHERS PAUL J A, HODGKINSON R, et al. Influence of rural land use on streamwater nutrients and their ecological significance [J]. *J Hydrol*, 2008, **350**: 166 - 186.
- [4] JARVIE H P, HAYGARTH P M, NEAL C, et al. Stream water chemistry and quality along an upland-lowland rural land-use continuum, south west England [J]. *J Hydrol*, 2008, **350**: 215 - 231.
- [5] 魏复盛, 齐文启, 毕彤, 等. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [6] 姜培坤, 徐秋芳, 储家森, 等. 雷竹早产高效栽培过程中土壤养分质量分数的变化[J]. 浙江林学院学报, 2006, **23** (3): 242 - 247.
JIANG Peikun, XU Qiufang, CHU Jiamiao, et al. Soil nutrients in response to intensive management of *Phyllostachys praecox* [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2006, **23** (3): 242 - 247.
- [7] 金树权, 吕军, 陈丁江, 等. 曹娥江三典型支流的水质对比研究[J]. 水土保持学报, 2006, **20** (5): 121 - 125.
JIN Shuquan, LÜ Jun, CHEN Dingjiang, et al. Comparative study of water quality of three typical tributaries within Caoe River system [J]. *J Soil Water Conserv*, 2006, **20** (5): 121 - 125.
- [8] 姜培坤, 徐秋芳, 钱新标, 等. 雷竹林地覆盖增温过程中土壤化学性质的动态变化[J]. 浙江林学院学报, 1999, **16** (2): 123 - 130.
JIANG Peikun, XU Qiufang, QIAN Xinbiao, et al. Dynamic changes of chemical properties of warmer soil covered with different organic materials in *Phyllostachys praecox* forests [J]. *J Zhejiang For Coll*, 1999, **16** (2): 123 - 130.
- [9] MERRILL A G, BENNING T L. Ecosystem type differences in nitrogen process rates and controls in the riparian zone of a montane landscape [J]. *For Ecol Manage*, 2006, **222**: 145 - 161.
- [10] NEILL C, PICCOLO M C, STEUDLER P A, et al. Nitrogen dynamics in soils of forests and active pastures in the western Brazilian Amazon Basin [J]. *Soil Biol Biochem*, 1995, **27** (9): 1167 - 1175.
- [11] 杨胜天, 程红光, 步青松, 等. 全国土壤侵蚀量估算及其在吸附态氮磷流失量匡算中的应用[J]. 环境科学学报, 2006, **26** (3): 366 - 374.
YANG Shengtian, CHENG Hongguang, BU Qingsong, et al. Estimation of soil erosion and its application in assessment of the absorbed nitrogen and phosphorus load in China [J]. *Acta Sci Circumstan*, 2006, **26** (3): 366 - 374.
- [12] 陈光, 刘廷良, 孙宗光. 水体中 TOC 与 COD 相关性研究[J]. 中国环境监测, 2005, **21** (5): 9 - 12.
CHEN Guang, LIU Tingliang, SUN Zongguang. Research of the correlation between TOC and COD in water [J]. *Environ Monitor China*, 2005, **21** (5): 9 - 12.