

三峡小流域水体硝态氮含量变化特征及其影响因素研究

冯明磊¹, 胡荣桂^{1*}, 许克翠², 肖宏宇¹, 阮雷雷¹, 林杉¹

(1. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070; 2. 湖北省秭归县水土保持局, 秭归 443600)

摘要: 为了解三峡地区典型农业流域水体水质状况以及对流域各影响因素的响应, 在 2004 年和 2005 年间, 对三峡库区内长江一级支流曲溪的水体硝态氮含量进行了连续监测, 利用划分子流域的方法, 分析了该流域异质景观条件下溪流水硝态氮含量的变化特征. 结果表明, 该流域溪流水体中硝态氮含量变化在 $0.4 \sim 14.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 且其含量冬季 > 秋季 > 夏季 > 春季, 年际之间也存在着一定的差异, 随着农业活动对环境影响的日益加剧水体中硝态氮含量还有加大的趋势; 在该流域内水体硝态氮含量与不同类型的土地利用之间存在不同程度的相关性; 而且流域内地质水文特征等环境因素对水体硝态氮含量有一定的影响, 说明在流域尺度上水体硝态氮含量对影响因素的响应是明显的.

关键词: 三峡地区; 子流域; 硝态氮含量

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)01-0013-06

Variations and Influencing Factors of Nitrate Nitrogen Concentration in Water in a Small Watershed of Three Gorges Area

FENG Ming-lei¹, HU Rong-gui¹, XU Ke-cui², XIAO Hong-yu¹, RUAN Lei-lei¹, LIN Shan¹

(1. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Water and Soil Conservation Bureau of Zigui County in Hubei Province, Zigui 443600, China)

Abstract: In order to study the water quality and response to influencing factors in typical watersheds of Three Gorges area between 2004 and 2005, the variation characteristics of nitrate nitrogen concentration were analyzed under heterogeneous landscape condition through continuous observation with method of dividing into sub-watersheds in Quxi watershed (the first-grade branch, located in Three Gorges). The results suggested that nitrate nitrogen concentration fluctuated between 0.4 and $14.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ with the highest in winter, higher in autumn and summer and lower in spring. Discrepancy also exists in different years. In addition, nitrate nitrogen concentration shows increasing trends with the aggravating impacts of agricultural activities on environment. Moreover, nitrate nitrogen concentration had some relationships with different land use types and space layout to some extent, and was also affected by geological and hydrological characters in the sub-watersheds, which indicated that response of nitrate nitrogen concentration in water was evident to influencing factors.

Key words: Three Gorges Area; sub-watershed; nitrate nitrogen concentration

农业活动已经成为环境非点源污染的主要源头^[1], 在中国等发展中国家, 为了满足不断增长的人口对粮食的需求, 农业生产中化肥的大量使用已成为习惯, 从而使农田营养富集和地表水富营养化^[2~5]. 非点源污染的形成不仅仅与化肥、农药的使用量及其在土壤中残余量有关, 还取决于在不同景观的空间位置及其组合^[6~7]. 许多学者认为在时空尺度上土地利用/土地覆盖与其贡献决定了水体中污染物含量的变化, 并认为对流域内复杂土地利用模式的分析将有助于解释水体水质的时空变化^[8], 而水体硝态氮水平不断增加是由于土地利用/土地覆盖的改变引起的^[6], 在日本北海道东部^[9]和南部^[10]的研究指出, 在丘陵山地各种土地利用类型的比例与河流中硝态氮的含量有显著的相关性(r 为 0.83 和 0.78), 所以研究流域内土地利用方式对水质的影响具有重要的意义.

长江是世界第三长河, 为世界上 $5\% \sim 10\%$ 的

人口提供水源, 同时为中国 40% 的农业用地提供灌溉和营养保证. 从三峡大坝建设以来, 三峡库区生态环境的研究成为国内外关注的热点. 已有的研究表明, 三峡水库营养物质负荷较大, 特别是氮磷的浓度与国内外已发生富营养化现象的水库相近或偏高^[11]. 针对这些问题, 不同研究者对长江氮负荷从全流域或较大尺度上进行了较为详细的研究. 包括几大支流的氮、磷等营养元素状况、整个流域氮的输入和输出情况、入海氮量及长江水体氮的入海输送能力、长江流域农业用地氮的负荷情况^[12~17]. 这些研究大都着眼于大流域或整个长江流域, 对长江中上游的小流域研究内容较少见. 而小流域水质状况直接影响到长江主流的水环境, 大量研究表明流域

收稿日期: 2007-01-13; 修订日期: 2007-02-12
基金项目: 国家自然科学基金项目(40471131)
作者简介: 冯明磊(1978 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为环境生态, E-mail: minglei@163.com
* 通讯联系人, E-mail: honggui@163.com

内水体两岸的土地利用是水体水质和水生生物栖息状况的最好预测者^[18~20],同时河流水质与河畔区域的土地利用有很好的相关性^[8, 21, 22].因此,为了更好的了解三峡库区典型小流域内水体水质状况以及其控制因子,本课题选择长江一级支流曲溪为对象,进行了为期 2 a 的调查和研究,以期获得在基水流条件下水体硝态氮含量的变化规律及与之相关的环境因素之间的关系,从而为三峡库区水质污染的预防和治理提供基础的理论依据和数据支持.

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域概况

研究区域是湖北省秭归县境内的曲溪流域(E 110°55'35"~110°57'20";N 30°50'4"~30°51'29"),距三峡大坝 8 km,距秭归县城 23 km(图 1).该流域处于三峡库区鄂西隆起褶皱带上,经过漫长的地质演化加上长期风雨等外营力的侵蚀,形成了以山地为主的地貌景观.地势高差大,最低海拔 133.2 m,最高海拔 632.1 m.流域内除下游沟底地势较平坦外,其余均为坡度在 15°以上的山地.地带性土壤为花岗岩母质出露发育形成的黄壤及黄棕壤,土壤有机质通常在 0.3% 以下,粘粒(<0.001 mm 的粘粒)在 5% 以下.该流域属亚热带季风气候,年平均气温大于或等于 10℃ 的活动积温为 5 723.6℃,年均气温为 18.0℃,年无霜期为 326 d.空气相对湿度 72%,平均年日照时数 1 800 h,年降雨量为 1 100 mm 左右,是湖北著名的冬暖区.

曲溪流域周围都有山体围绕,只有 1 条溪流直接进入长江.该流域为传统的农业区,且为三峡的移民地区,移民搬迁活动给本流域生态环境造成一定的影响,如 1995 年以前生态林覆盖面积在 50% 以上,至 2005 年覆盖率只有不到 20%,移民把大面积的灌木林改造为农田或果园.随着人口的增加和经济发展的需要,该流域又出现了规模性养殖业和专业化种植业,这些活动将对流域内水环境造成深远的影响.

1.2 气候及土地利用数据来源

研究区气象、流域特征数据和水文数据均来自于当地离研究区最近的气象站或相关部门的观测或统计资料.土地利用类型数据是通过对该流域内的土地利用现状图的分析和调绘,运用 ARC/GIS 等图像和数据处理软件统计获得.基于秭归县现有的土地利用现状图以及现场踏勘把该流域内土地划分为 6 种不同的利用方式,分别是水田、旱地、林地、园地、居民地和

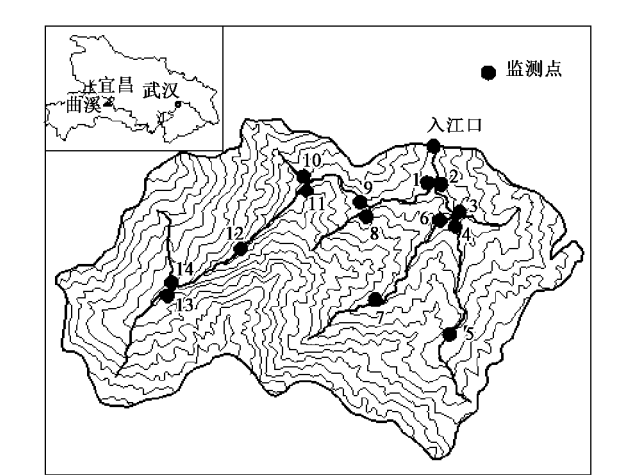


图 1 曲溪位置及监测点分布
Fig.1 Location of Quxi watershed in China and sampling points

其他类型用地,农户施肥量由实地调查获得.

1.3 水样采集与分析

根据曲溪流域土地景观以及地形地势特征,在研究区共布置了 15 个监测点(流域内设 14 个监测点,入江口设置 1 个监测点,见图 1),并利用 GPS 严格定位.在研究中把每个监测点的上游部分作为一个子流域,作为影响该监测点水质的作用范围.自 2004 年初到 2005 年底,每月月底采样,每样点采水样 500 mL,用聚乙烯塑料瓶密封带回实验室及时进行测定.在采样的同时,对水体的水温和 pH 值等进行测定,并同时记录气温等基础数据.水样在室内用 Flaster 5000 流动注射分析仪进行硝态氮的测定;氨态氮含量采用纳氏比色法进行测定;可溶性氮和全氮含量利用过硫酸钾硝解-紫外分光光度法测定.多次测定结果显示,该流域水体中氮以硝态氮为主,占到总氮的 80% 以上,所以本研究主要就基流条件下硝态氮的变化特征进行分析.

1.4 数据处理及统计

将每季度中 3 个月所测得数据求平均值作为该季度水体硝态氮含量,每年 12 个月的平均值作为年均硝态氮含量.用 SPSS 等分析工具进行数据的统计和分析.

2 结果与分析

2.1 流域土地利用现状

表 1 是每个子流域范围内各类土地利用的百分比以及施肥等环境因素.从表 1 可以看出,该流域主要以农业用地为主(水田、旱地、园地),占 60% 以上,林地平均为 17.7%.不同子流域内单位面积上

化肥(纯氮)的平均施用量为 223.2 kg•hm⁻²,最低为 56.8 kg•hm⁻²,最高达 343 kg•hm⁻².

2.2 水体硝态氮含量特征

表 2 是不同季节水体中硝态氮含量的变化.结果表明,硝态氮含量变化在 0.4 ~ 14.6 mg•L⁻¹之间, 相差近 37 倍.各个监测点硝态氮含量从 2004 年春季到 2005 年冬季呈现出不断增加的趋势,2005 年的年平均含量是 2004 年的一倍以上.其季节性变化在不同年份大致相同,均表现为冬季 > 秋季 > 夏季 > 春季.3 号监测点和 8 号监测点在不同年份均较其

表 1 土地利用类型及相关环境特征

Table 1 Characteristics of land use and related environmental factors

监测点	面积/hm ²	土地利用类型占总面积的百分比/%						化肥 /kg•hm ⁻²	农药 /kg•hm ⁻²
		水田	旱地	林地	园地	居民地	其他		
1	3 835.4	12.4	31.5	17.1	24.5	7.2	7.3	277.0	7.4
2	2 665.7	17.2	30.1	15.3	25.9	7.2	4.3	228.9	6.8
3	1 087.3	24.2	26.4	7.9	29.2	8.1	4.2	244.0	9.0
4	969.6	18.5	25.6	18.3	22.8	8.2	6.6	291.6	6.6
5	335.2	9.2	15.6	33.2	26.5	3.2	12.3	78.2	0.6
6	438.6	18.6	21.3	14	32.1	6.4	7.6	184.3	7.9
7	2 609.2	19.2	29.2	17.2	21.9	8.3	4.2	202.0	9.2
8	763.6	21.5	20.6	11.8	33.3	9.2	3.6	343.2	15.2
9	1 980.2	13.9	32.1	19.6	22.9	6.2	5.3	228.2	8.2
10	605.2	21.6	18.6	12.9	24.1	9.6	13.2	239.2	12.4
11	623.5	12.3	32.6	8.6	25.6	8.6	12.3	243.7	6.6
12	365.8	8.6	36.2	14.5	23.4	11.4	5.9	206.2	12.4
13	688.2	7.6	13.2	45.6	19.2	3.2	11.2	56.8	0.9
14	308.7	23.9	28.4	11.6	24.6	7.9	3.6	302.5	11.2
平均	1 234.0	16.3	25.8	17.7	25.4	7.5	7.3	223.3	8.2

表 2 水体硝态氮含量季节变化表/mg•L⁻¹

Table 2 Seasonal changes of nitrate nitrogen concentration in water/mg•L⁻¹

监测点	2004 年					2005 年				
	春季	夏季	秋季	冬季	平均	春季	夏季	秋季	冬季	平均
1	1.5	4.0	3.0	4.3	3.2	5.6	6.1	8.9	10.2	7.7
2	2.3	2.1	4.1	4.1	3.1	5.1	6.3	7.0	9.6	7.0
3	3.1	2.3	3.0	3.5	3.0	3.8	7.3	6.5	8.2	6.4
4	2.7	3.3	3.5	4.1	3.4	4.3	8.8	8.3	10.0	7.8
5	1.8	1.7	2.7	3.1	2.3	3.1	5.5	5.3	4.6	4.6
6	0.4	3.9	3.6	4.0	3.0	4.6	9.0	7.7	10.0	7.8
7	1.8	3.1	4.0	4.2	3.3	3.6	6.4	7.5	9.8	6.8
8	2.2	4.7	5.7	4.9	4.4	5.1	8.0	11.2	13.8	9.5
9	2.0	3.0	3.2	3.8	3.0	2.5	5.3	6.6	8.4	5.7
10	2.0	3.0	2.2	3.8	2.8	2.7	7.0	6.3	8.6	6.1
11	2.3	3.1	3.2	3.9	3.1	3.1	4.9	6.5	8.4	5.7
12	3.1	1.7	3.1	3.9	3.0	2.9	5.2	6.6	8.4	5.8
13	3.5	2.7	3.3	3.9	3.3	2.5	6.2	6.8	8.6	6.0
14	3.3	5.7	4.2	6.3	4.4	7.3	10.7	13.1	14.6	11.4
平均	2.1	3.2	3.5	4.1	3.2	4.0	6.9	7.7	9.5	7.0

它监测点高,而 5 号点则明显低于其它监测点.

2.3 水体硝态氮含量与流域特征关系

表 3 是利用 SPSS 软件分析得出的水体中硝态氮季节性含量与子流域不同时间土地利用面积占总面积比例、施肥量和施药量之间的 Pearson 相关系数.从表 3 可以看出水体中硝态氮含量与水田所占

比例和化肥的施用量虽然不同季节有很大差异,但是整体上具有很好的相关性,与旱地、园地、居民地所占比例的相关性较小,而与林地和其它类型用地面积呈负相关.

2.4 水流通量和降雨量对水体硝态氮含量的影响
表 4 是曲溪水流通量及降雨量.从曲溪入江口

表 3 硝态氮季节性含量与环境因素的相关系数¹⁾

Table 3 Correlation coefficient(<i>r</i>) between the environmental factors and nitrate nitrogen concentration									
年份	季节	水田	旱地	林地	园地	居民地	其他	化肥	农药
2004 年	春季	-0.041	0.055	0.173	-0.439	0.119	-0.133	0.005	0.010
	夏季	0.522 *	-0.011	-0.302	0.264	0.130	-0.323	0.590 *	0.424
	秋季	0.357	0.059	-0.212	0.239	0.170	-0.670 *	0.473	0.211
	冬季	0.475	0.194	-0.307	0.067	0.271	-0.511 *	0.580 *	0.181
2005 年	春季	0.216	0.188	-0.389	0.346	0.145	-0.553 *	0.590 *	0.309
	夏季	0.716 **	-0.229	-0.260	0.335	0.097	0.489	0.430	0.320
	秋季	0.304	0.085	-0.297	0.251	0.230	-0.546 *	0.641 *	0.491
	冬季	0.586 *	0.167	-0.415	0.255	0.255	-0.607 *	0.719 **	0.212

1) ** 表示相关性极显著, * 表示相关性显著

水流通量可以看出,2005 年的径流量只占到 2004 年的 60% 左右.此外,从表 4 中还可以看出,降雨量主要集中在 5~8 月份,占到全年降雨总量的 60% 以上.利用 SPSS 软件分析结果表明水流通量和水样之间的 Pearson 相关系数在 $\alpha = 0.01$ 水平时为 -0.737,达到了极显著水平.进一步分析结果表明,入江口水流通量与该点水样中硝态氮含量存在着对数关系(图 2).

表 4 水流通量及其降雨量

Table 4 Water flux and precipitation

月份	水流通量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$		降雨量/mm	
	2004 年	2005 年	2004 年	2005 年
1	1.27	0.58	23.7	11.8
2	1.15	0.63	36.4	46.0
3	1.22	0.61	33.5	43.6
4	1.09	0.65	89.7	103.8
5	1.33	0.65	123.6	115.0
6	1.18	0.78	103.7	85.8
7	1.83	0.96	229.7	266.0
8	1.72	0.89	249.9	284.7
9	1.23	0.74	78.9	56.6
10	1.12	0.63	69.7	76.6
11	0.82	0.59	32.1	21.3
12	0.98	0.57	15.6	6.4
合计			1 117.6	1 086.5

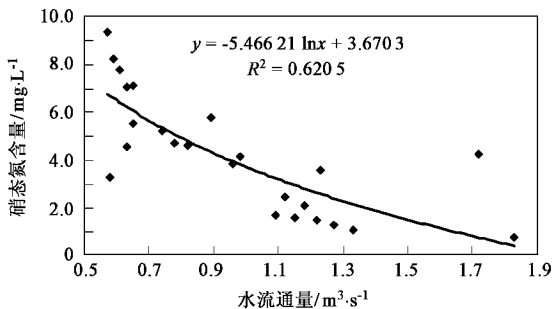


图 2 入江口水流通量与硝态氮含量关系

Fig.2 Relationship between water flux of estuary and nitrate nitrogen concentration

3 讨论

从以上分析可知,曲溪流域水体中的硝态氮含量高于三峡水库水体总氮含量(1.10~1.85 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)[²³],也比库区其它流域水体中的含量高[^{23~25}].这是因为该流域是传统的农业区,种植业用地面积占流域总面积 60% 以上(表 1),高于库区平均值.在传统的作物种植方面,施肥量也比一般区域要高很多,如张维理等的调查结果显示,库区氮肥施用量在 $368 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ [²⁶].此外,该流域近年来新改种经济林面积较大,处在苗期的经济林施肥量比农田高,而其保水性能则远低于原来的作物,导致水肥的大量流失[^{27, 28}].

3 号和 8 号监测点硝态氮含量高于其它监测点是因为在这 2 个监测点的上游有养猪场,且其污水直接排放到溪流中给溪流造成了一定的污染.这与张维理等在对五大湖和三峡等流域研究后指出农村规模养殖业成为各大水域重要的污染源是一致的[^{29, 30}].

在本研究中,冬季水体硝态氮含量最高,而夏季较低.这可能是因为冬季降雨较少(表 4),而夏季降雨量较高,地下水的增加提高溪水的流量稀释了渗出的硝态氮.研究表明在夏季降雨多发季节雨水较易形成地表径流,造成严重的水土和水肥流失,从而导致水体中营养物质含量急剧升高[³¹].本研究的结果之所以与此不符,主要原因是本研究中采样都是在晴天进行的,所采水样基本是流域的基流,地表径流的影响作用可以忽略.

表 3 显示出流域水体中硝态氮含量与流域土地利用方式有着很好的相关性.这与一些研究指出土地利用方式及景观特征在非点源污染中扮演着重要角色的结果相同[^{8, 32}].水田所占的面积与流域水体中的硝态氮含量有着比其它土地利用类型更好的正

相关性,这与该流域水田的种植面积较大,施肥量较高有关.园地一般在农户周围,且施肥量更高,Bansyat 等^[6]的研究也表明园地对流域水体氮含量有着重要贡献,这与研究结果是一致的.

相对于农田而言,林地实际上扮演着一个汇或污染物转化地的角色.一般来说林地所占比例越大,溪流硝态氮含量水平就越低,所以本研究中林地面积与水体中的硝态氮含量呈负相关.Sollins 等的研究指出森林的密度和森林类型影响到氮素的固定和吸收,从而影响到氮素从林地流失的数量^[6, 33].5 号监测点上游主要以天然林地为主,受人为干扰较少,其水体中硝态氮含量较低.而 13 号监测点尽管其上游林地所占比例较大,含量并不低.这是由于该监测点上游有一自来水厂,该厂对溪流的截留和处理使水体受到了较大的影响.

农村居住区以及其它土地利用类型对水体中硝态氮的含量亦有重要影响.本研究中,所谓其它用地主要是水体和道路所占的面积,表 3 的结果表明这部分地类与水体中硝酸盐含量呈负相关,尹澄清等^[34]通过 6 a 的试验研究,发现多塘法能截留来自农庄和农田 N、P 污染负荷量达 94% 以上,这一结果可能暗示流域内水塘等对污染物具有一定的拦截作用.

水流通量与水体硝态氮含量呈显著相关性且具有线性回归关系(图 2).Cardi 在意大利小流域土地利用和管理对水体影响的研究中指出,水体硝态氮含量与水流通量存在显著的对数关系,与本研究获得的结果相同^[35].在本研究中,流域内水流通量从 2004 年初到 2005 年底是随时间的推移逐渐减少的,这种现象一方面是由于 2005 年降雨明显少于 2004 年,另一方面则与移民增加,流域内植被和土地利用方式的改变有关.

研究表明流域水体在不受降雨径流影响情况下,源头的硝态氮含量制约了溪流总体的氮素含量.一些学者认为是接近溪流的土地利用方式和面积直接影响水体水质,而不是全流域土地利用的特性^[20, 36, 37].也有研究认为源头更重要,如 Peterson 等^[38]认为源头氮素含量是流域氮输出的一个重要因子.而 Bansyat 等^[6]的研究则认为,对河流水质造成影响区域是河流周边十分接近水流的土地利用活动和其他一些人类活动场所,这些作用区内的任何干扰活动都可能对河流水质造成显著的影响.在本研究中,离溪流最近的是水田、旱地和园地或居住地,离溪流最远处为林地.这些因素及其空间布局是

造成溪流水体硝态氮含量特征的重要原因.

4 结论

(1)在基流情况下流域水体中硝态氮含量高于三峡水库库内水体,且有逐渐增加的趋势.水体中硝酸盐含量表现出:冬季 > 秋季 > 夏季 > 春季的季节性特征,且年际之间由于水流通量的不同也存在较大的差异.

(2)水体硝酸盐含量与流域土地利用类型有关,其含量与流域的农用地面积有很好的正相关,而与林地呈负相关,林地等对氮素有一定的截留作用.流域内水文特征和农业活动对水体氮素含量具有很大的影响.

参考文献:

- [1] Cooper C M. Biological effects of agriculturally derived surface water pollutants on aquatic systems—a review [J]. *J Environ Qual*, 1993, **22**: 402-408.
- [2] 贺维生,陈利顶,傅伯杰.非点源污染的控制和管理[J]. *环境科学*, 1998, **19**(5): 87-91.
- [3] 吕耀.苏南太湖流域农业非点源污染及农业持续发展战略[J]. *环境科学动态*, 1998, **2**: 1-4.
- [4] 王刚,郭柏权.于桥水库水体状况分析与污染防治对策[J]. *城市环境与规划*, 1999, **12**(2): 27-28.
- [5] 杨爱玲,朱颜明.地表水环境非点源污染研究[J]. *环境污染治理与设备*, 1999, **7**(5): 60-67.
- [6] Bansyat P, Teeter L D, Flynn K M, *et al.* Relationships between landscape characteristics and non-point source pollution inputs to coastal estuaries [J]. *Environmental Management*, 1999, **23**(4): 539-549.
- [7] Nikolaidis N P, Heng H, Semagin R, *et al.* Non-linear response of a mixed land use watershed to nitrogen loading [J]. *Agriculture Ecosystem and Environment*, 1998, **67**(3): 251-265.
- [8] 陈利顶,傅伯杰.异质景观中非点源污染动态变化比较研究[J]. *生态学报*, 2002, **42**(4): 424-432.
- [9] Tabuchi T, Yoshino K, Shimura M, *et al.* Relation between land use and nitrate concentration of outflow water from watersheds of agricultural and forest areas [J]. *Japan Soc Irrigation Drainage Reclamation Eng*, 1995, **178**: 129-135.
- [10] Woli K P, Nagumo T, Hatano R. Evaluating impact of land use and N budgets on stream water quality in Hokkaido, Japan [J]. *Nutr Cycl Agroecosys*, 2002, **63**: 175-184.
- [11] 洪一平,叶闽,臧小平.三峡水库水体中氮、磷影响研究[J]. *中国水利*, 2004, **20**: 23-24.
- [12] Zhang J, Zhang Z, Liu S, *et al.* Human impacts on the large world rivers: would Changjiang (Yangtze River) be an illustration? [J]. *Global Biogeochem Cycles*, 1999, **13**(4): 1099-1105.
- [13] Liu S, Zhang J, Chen H, *et al.* Nutrients in the Changjiang and its tributaries [J]. *Biogeochemistry*, 2003, **62**: 1-18.
- [14] Xing G, Zhu Z. Regional nitrogen budgets for China and its major watersheds [J]. *Biogeochemistry*, 2002, **57**: 405-427.

- [15] Yan W, Yin C, Zhang S. Nutrient budgets and biogeochemistry in an experimental agricultural watershed in south eastern China[J]. *Biogeochemistry*, 1999, **4**: 1-19.
- [16] Shen Z, Liu Q, Zhang S, *et al.* A nitrogen budget of the Changjiang River catchment [J]. *Ambio*, 2003, **32**(1): 69-79.
- [17] Xiang B, Watanabe M, Wang Q X, *et al.* Nitrogen budgets of agricultural fields of the Changjiang River basin from 1980 to 1990 [J]. *Science of Total Environment*, 2006, **363**: 136-148.
- [18] Omernik J M, Abernathy A R, Male L M. Stream nutrient levels and proximity of agricultural and forest land to streams some relationships [J]. *Soil and Water Conservation*, 1981, **36**: 227-231.
- [19] Roth N E, Allan J D, Erickson D L. Landscape influences on stream biotic integrity assessed at multiple spatial scales [J]. *Landscape Ecology*, 1996, **11**: 141-156.
- [20] Johnson L B, Richards C, Host G E, *et al.* Landscape influences on water chemistry in Midwestern stream ecosystems [J]. *Freshwater Biology*, 1997, **37**: 193-208.
- [21] Lammert M, Allan J D. Assessing biotic integrity of streams effects of scale in measuring the influence of land use/cover and habitat structure on fish and macroinvertebrates [J]. *Environmental Management*, 1999, **23** (2): 257-270.
- [22] Sponseller R A, Benfield E F, Valett H M, *et al.* Relationships between land use, spatial scale and stream macroinvertebrate communities [J]. *Freshwater Biology*, 2001, **46**: 1409-1424.
- [23] 张远, 郑丙辉, 刘鸿亮, 等. 三峡水库蓄水后氮、磷营养盐的特征分析[J]. *水资源保护*, 2005, **21**(6): 23-26.
- [24] 刘永明, 贾绍凤, 蒋良维, 等. 三峡水库重庆段一级支流回水河段富营养化潜势研究[J]. *地理研究*, 2003, **22** (1): 67-72.
- [25] 方涛, 付长营, 敖鸿毅, 等. 三峡水库蓄水前后氮磷污染研究[J]. *水生生物学报*, 2006, **30**(1): 26-30.
- [26] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I .21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. *中国农业科学*, 2004, **7**(7): 1008-1017.
- [27] 许峰, 蔡强国, 吴淑安, 等. 三峡库区坡地生态工程控制土壤养分流失研究[J]. *地理研究*, 2000, **19**(3): 304-310.
- [28] 许书军, 魏世强, 黄进, 等. 三峡库区农田营养动态及非点源污染情势[J]. *能源环境保护*, 2003, **17**(4): 52-55.
- [29] 张维理, 冀宏杰, Kolbe H, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 II .欧美国家农业面源污染状况及控制[J]. *中国农业科学*, 2004, **37**(7): 1018-1025.
- [30] 张维理, 徐爱国, 冀宏杰, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 III .中国农业面源污染控制中存在问题分析[J]. *中国农业科学*, 2004, **37**(7): 1026-1030.
- [31] 蔡崇法, 丁树文, 史志华. GIS 支持下三峡库区典型小流域营流流失量预测[J]. *水土保持学报*, 2001, **15**(1): 9-12.
- [32] Peterjohn W T, Correll D L. Nutrient dynamics in an agricultural watershed: observations on the role of a riparian forest [J]. *Ecology*, 1984, **65**: 1466-1475.
- [33] Sollins P, Grier C C, McCorison F M, *et al.* The internal element cycles of old-growth Douglas-fir ecosystems in western [J]. *Oregon Ecology Monograph*, 1980, **50**: 261-285.
- [34] 尹澄清, 毛战坡. 用生态工程技术控制农村非点源污染[J]. *应用生态学报*, 2002, **13**(2): 229-232
- [35] Gardi C. Land use, agronomic management and water quality in a small Northern Italian watershed [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2001, **8**: 1-12.
- [36] Osbome L L, Wiley M J. Empirical relationships between land use/cover and stream water quality in an agricultural watershed [J]. *Journal of Environmental Management*, 1988, **26**: 9-27.
- [37] Hunsaker C T, Levine D A. Hierarchical approaches to the analysis of aquatic ecosystems [J]. *Freshwater Biology*, 1995, **37**: 113-132.
- [38] Peterson B J, Wollheim W M, Mulholland P J, *et al.* Control of nitrogen export from watersheds by headwater streams [J]. *Science*, 2001, **292**: 86-90.