ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第1期

Vol.38 No.1

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第38卷 第1期
2017年1月15日

目 次

三峡库区水体中可溶性 C、N 变化及影响因素

范志伟,郝庆菊,黄哲,柴雪思,江长胜*
(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 2. 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400716)

摘要: 为了解三峡库区水体中可溶性 C、N 的变化,本研究于 2011 年 3 月至 2012 年 8 月在三峡水库涪陵段进行了每周一次的水样采集,分析其中可溶性 C、N 成分的变化及其来源特征. 结果表明,库区水中 DOC 浓度范围为 0.64 ~ 9.07 $mg \cdot L^{-1}$,且有明显的季节变化,表现为:夏季 > 春季、秋季 > 冬季,DOC 年入库总量为 1.78×10^9 kg,入库量具有与浓度相似的季节变化趋势; DTN 的浓度范围为 2.59 ~ 4.35 $mg \cdot L^{-1}$,春季 > 冬季 > 夏季 > 秋季,年入库总量为 1.32×10^9 kg,入库量的季节变化特征:夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季,其中 DON、NO_3^--N分别占 DTN 的 30.35% ~ 63.45%、35.87% ~ 67.72%. DOC 受降水和温度的影响明显,水中 DOC 主要来自外源输入,春季、夏季降雨径流其外源输入量增加,而秋季、冬季则内源贡献有所增加; DTN 受人为排放和水体稀释的影响相对较大. 相关分析表明,DOC 与 DON 呈显著负相关($P < 0.05$),通常以 DOC/DON 比值反映水中 DOM 的来源,库区 DOC/DON 范围为 0.35 ~ 7.28,DOM 来源具有明显的季节特征. 夏季 DOC/DON 较高,DOM 主要来自流域侵蚀; 冬季 DOC/DON 较低,DOM 主要来自生活污水排放和内源现场产生; 春季、秋季 DOC/DON 介于两者之间,DOM 来源包括流域侵蚀、生活污水排放及现场产生等.

关键词:三峡库区; 可溶性 C、N; 入库总量; 影响因素; 季节变化
中图分类号: X524 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2017)01-0129-09 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201606031

Change and Influencing Factors of Dissolved Carbon and Dissolved Nitrogen in Water of the Three Gorges Reservoir

FAN Zhi-wei, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, CHAI Xue-si, JIANG Chang-sheng*
(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Chongqing 400716, China)

Abstract: In order to understand the changes of dissolved carbon and dissolved nitrogen in the water of Three Gorges Reservoir, this research was carried out once a week by the bank of Yangtze River in Fuling beach from March 2011 to August 2012, and the variation characteristics of dissolved C, N composition and their source were analyzed. The results showed that the concentration of DOC ranged from 0.64 $mg \cdot L^{-1}$ to 9.07 $mg \cdot L^{-1}$, and had obvious seasonal change: summer > spring and autumn > winter. Annual total input of DOC was 1.78×10^9 kg, the seasonal change trend of the total input of DOC was similar to that of the concentration of DOC; The concentration of DTN ranged from 2.59 $mg \cdot L^{-1}$ to 4.35 $mg \cdot L^{-1}$: spring > winter > summer > autumn, annual total input was 1.32×10^9 kg, the seasonal input changed in the order of summer > autumn > spring > winter, among them DON, NO_3^--N accounted for 30.35%-63.45% and 35.87%-67.72%, respectively. DOC was affected by precipitation and air temperature, and mainly came from the exogenous input, in the spring and summer its exogenous input increased with the increase of rainfall runoff, but in the autumn and winter the endogenous contribution increased; DTN was relatively affected by human emissions and water dilution. Correlation analysis showed that there was a significant negative correlation between DOC and DON ($P < 0.05$), DOC/DON ratio usually reflects the source of the DOM, the DOC/DON in the water of three gorges reservoir ranged from 0.35 to 7.28, the source of DOM had obvious seasonal characteristics. DOC/DON was the highest in summer, and the DOM mainly came from watershed erosion; DOC/DON was the lowest in winter, and the DOM mainly came from living sewage and endogenous field; the DOC/DON ratios in spring and autumn were higher than those in winter and lower than those in summer, and the DOM sources included watershed erosion, living sewage and endogenous field.

Key words: Three Gorges Reservoir; dissolved C and N; storage amount; influencing factors; seasonal variation

河流是物质由陆地向海洋运送的重要途径,全世界每年由河流输送到海洋的有机碳和氮素约为 4.0×10^8 t 和 3.0×10^7 t[1,2]. 其中,可溶性有机碳(DOC)、可溶性氮是河流水生态系统中重要的 C 源、N 源,对重金属污染物迁移和水生态系统结构的稳定具有重要的影响[3,4]. 在饮用水处理中,可溶性有机氮(DON)可产生亚硝胺等强致癌性的含氮消毒副产物[5,6],对居民饮用水安全也构成威胁. DOC 和 DON 是溶解性有机质(DOM)的主要组成部分[7],通常 DOC/DON 比值反映了水中 DOM 的来

收稿日期: 2016-06-06; **修订日期**: 2016-08-05
基金项目: 国家自然科学基金项目(41275160,40975095);中央高校基本科研业务费专项(XDJK2015A013, XDJK2016D040)
作者简介: 范志伟(1989 ~),男,硕士研究生,主要研究方向为农田生态系统碳氮循环,E-mail: 704365636@qq.com
* 通信作者,E-mail: jiangcs@126.com

源. 三峡工程是我国具有战略意义的水资源综合利用工程,由于三峡大坝的建成运行,使长江输送到海洋的泥沙明显减少,这改变了河流输送的物质组成,水中溶解态物质所占的比例将增加[8],可溶性 C、N 将扮演越来越重要的角色. 目前,对长江水体中有机碳的研究多集中在河口颗粒态有机碳(POC)的变化及其环境效应[9, 10],而对长江上游水体中 DOC 的研究较少[8, 11],长江水体中 N 素的研究多是针对水体富营养化问题[12~14],且水体中 DON 研究相对较少[11].

三峡工程建成以后,三峡水库生态系统一直是国内外关注的热点. 因此,探索三峡库区水中 DOC 和可溶性氮的变化对了解水体中有机质来源及迁移转化规律研究,乃至对提高饮用水安全都具有重要的意义. 在此基础上本文分析了 2011 年 3 月底至 2012 年 8 月底三峡水库涪陵段水体的检测数据,研究了库区水中 DOC、可溶性氮的变化特征,并结合入库流量探讨了水中 DOC、可溶性氮的来源、浓度和入库总量变化,可溶性氮各组分之间及其与 DOC 间的关系等,以期为三峡库区水资源管理提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于重庆市涪陵区珍溪镇王家沟流域,该地区具有三峡库区典型的山地、丘陵夹沟谷地形,地貌特征为低山丘陵为主. 其消落带地势平坦,人为干扰因素较少,属三峡水库开阔河段冲积土典型消落区. 年均气温为 17.9℃,月气温最高月在 8 月,平均为 28.6℃,最低月在 1 月,平均为 7.1℃,年均降水量为 1 006.8 mm,太阳辐射量年均 3 360.02 $MJ\cdot m^{-2}$,根据土壤普查分类显示,该地区土壤 pH 平均为 6.64,属于偏酸性土壤,土壤类型主要是紫色土和水稻土.

1.2 采样与分析方法

2011 年 3 月 28 日至 2012 年 8 月 30 日,通过小船在研究区域所在的长江岸边陆地高程约为 140 m 处固定每周进行 1 次水样采集. 采样时用干净的塑料瓶采集表层水样,共采集 3 个样品,采集后密封保存于 4℃的保温箱,立即带回实验室分析,采样时同时测定气温、水温、风速. 本研究中库区入库流量和水位高度数据均来自中国长江三峡集团公司网站.

DOC 和 DTN(可溶性总氮)的测定:从样品瓶中取出一定量的水样抽滤过 0.45 μm 微孔滤膜,用 Multi N/C 2000 分析测定滤液. NO_3^--N和NH_4^+-N的测定:从样品瓶中取出一定量的水样,过滤后,用 FIAstar 5000 流动注射分析仪分析测定滤液. 水中 DON 计算公式:DON = DTN − (NO_3^--N) − (NH_4^+-N). 若无特殊指出,下文中可溶性氮均指 DTN、NO_3^--N、NH_4^+-N和 DON 的总和.

1.3 数据处理与分析

由于本实验采样时间为 18 个月,不是两个整年,且有的参数可能年际变化较大,因此分析数据时,采用两年期间 6 个季节的数据(2011 年的春季、夏季、秋季、冬季和 2012 年的春季、夏季),而比较四季变化差异显著性时,库区的春季、夏季采用两年的数据. 本研究按照春季(3、4、5 月)、夏季(6、7、8 月)、秋季(9、10、11 月)、冬季(12 月 ~ 次年 2 月),划分库区的四季. 使用 SPSS 19.0 软件对文中数据进行分析,当数据总体不符合正态分布时,即单样本非参数 K-S 检验 $P < 0.05$,则进行多独立样本的 Kruskai-Wallis 检验;对于符合正态分布的数据,当其通过方差齐性检验($P > 0.05$)时,则进行均值间最小差异显著性 LSD 检验,若其不能通过方差齐性检验($P > 0.05$),则采用 Tamhane's T2 进行差异显著性检验. 数据年际变化采用配对 t 检验. 变量间的相关关系采用相关分析方法. 使用 Excel 2013 进行绘图,并对 DOC、TDN、DON、NO_3^--N、NH_4^+-N数据进行计算统计,得到月平均值浓度及月入库总量.

(1)库区 DOC、可溶性氮月平均浓度的计算

$$\rho_i = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\rho_{ij} \tag{1}$$

式中,ρ_i 代表第 i 月的平均浓度,$mg\cdot L^{-1}$;ρ_{ij}为第 i 月第 j 次的浓度,$mg\cdot L^{-1}$;n 为当月采样的次数.

(2)库区 DOC、可溶性氮采样当日入库通量的计算

$$V_{ij} = \rho_{ij}Q_{ij} \tag{2}$$

式中,V_{ij}代表第 i 月第 j 次入库的平均速率,$kg\cdot s^{-1}$;ρ_{ij}为第 i 月第 j 次的浓度,$mg\cdot L^{-1}$;Q_{ij}为第 i 月第 j 次的入库流量,$m^3\cdot s^{-1}$.

(3)库区 DOC、可溶性氮月入库总量的计算

$$F_i = \frac{t}{n}\sum_{i=1}^{n}V_{ij} \tag{3}$$

式中,F_i 代表第 i 月的总入库量,kg;t 为第 i 月的总时长,s;V_{ij}为第 i 月第 j 次入库的平均速率,$kg\cdot s^{-1}$;n 为当月采样的次数.

由于 2011 年 3 月只进行了一次采样，因此，2011 年 3 月的入库总量使用两年春季的均值取代.

2　结果与分析

2.1　三峡库区水中 DOC 浓度及其入库总量的变化

表 1 为 2011 年 3 月 ~2012 年 8 月期间库区水中 DOC 浓度和库区水位高度、入库流量数据. 从中可以看出，水中 DOC 的浓度范围为 0.64 ~ 9.07 $mg \cdot L^{-1}$，2011 年 3 ~ 7 月 DOC 浓度逐渐升高，2011 年 7 月 ~2012 年 1 月 DOC 浓度逐渐降低，2012 年 1 月 ~ 5 月 DOC 浓度又逐渐升高，2012 年 5 ~ 8 月 DOC 浓度波动较小. 最高浓度出现在 2011 年的夏季，最低浓度出现在 2012 年的冬季，季节变化特征明显：夏季[(7.78 ± 2.17) $mg \cdot L^{-1}$] > 次年夏季[(4.26 ± 0.69) $mg \cdot L^{-1}$] > 次年春季[(3.95 ± 3.14) $mg \cdot L^{-1}$] > 秋季[(3.04 ± 1.81) $mg \cdot L^{-1}$] > 春季[(2.81 ± 0.54) $mg \cdot L^{-1}$] > 冬季[(1.32 ± 0.61) $mg \cdot L^{-1}$]. 采用两年的春季($n = 20$)、夏季($n = 20$)的数据和 2011 年秋季($n = 12$)、冬季($n = 11$)的数据(下同)，比较 DOC 浓度的四季差异显著性，结果表明夏季显著高于其他季节($P < 0.05$). 水中 DOC 浓度夏季达到最高，这一结果与张永领等[15]在黄河小浪底水库的研究结果一致. 实验期间 DOC 的平均浓度为(3.86 ± 2.53) $mg \cdot L^{-1}$，与全球低纬度亚热带流域 DOC 平均浓度(6 $mg \cdot L^{-1}$)相比[16]，库区 DOC 浓度处于较低水平.

表 1　三峡库区每月 DOC、可溶性氮的浓度、水位高度及入库流量1)

Table 1　DOC, dissolved nitrogen, water level and flow in the Three Gorges Reservoir area in each month

时间(年-月)	DOC /$mg \cdot L^{-1}$	DTN /$mg \cdot L^{-1}$	DON /$mg \cdot L^{-1}$	NO_3^--N /$mg \cdot L^{-1}$	NH_4^+-N /$mg \cdot L^{-1}$	水位高程 /m	入库流量 /$m^3 \cdot s^{-1}$	库区温度 /℃
2011-03	2.23	3.96	1.80	2.02	0.14	163.60	6 300.0	15.00
2011-04	3.63	4.35	2.76	2.02	0.14	159.46	6 082.5	16.63
2011-05	3.30	4.08	1.89	2.13	0.06	153.71	7 200.0	22.61
2011-06	5.28	3.79	1.68	2.05	0.05	146.69	15 487.5	23.01
2011-07	9.07	3.78	1.54	2.15	0.10	146.75	19 981.3	25.02
2011-08	8.99	2.98	1.23	1.62	0.13	149.05	18 606.3	24.97
2011-09	4.70	3.00	1.47	1.42	0.12	159.49	19 571.9	26.50
2011-10	3.32	3.01	1.57	1.35	0.09	172.49	10 500.0	18.38
2011-11	1.12	3.20	2.47	1.39	0.08	174.66	11 493.8	14.60
2011-12	1.50	3.48	2.01	1.41	0.07	174.73	5 950.0	11.15
2012-01	0.64	3.35	1.88	1.52	0.05	173.49	5 034.4	10.10
2012-02	1.82	3.82	2.07	1.67	0.09	170.07	4 400.0	9.79
2012-03	2.12	3.78	2.04	1.64	0.10	164.69	4 709.2	15.27
2012-04	1.33	3.29	1.63	1.58	0.08	163.16	5 909.4	21.65
2012-05	6.67	3.87	1.91	1.87	0.09	155.67	13 750.0	24.22
2012-06	4.11	3.30	1.37	1.87	0.06	146.90	16 037.5	27.50
2012-07	5.19	3.74	1.71	1.95	0.09	152.35	39 825.0	30.13
2012-08	5.16	2.59	1.21	1.34	0.05	153.67	23 633.3	31.95

1)表中数据为当月平均值

图 1 为库区逐月的入库流量及由公式(2)和(3)算得的 DOC 入库总量. 从中可见，2011 年 3 ~ 8 月 DOC 入库总量呈增加的趋势，2011 年 8 月 ~2012 年 4 月 DOC 入库总量逐渐减少，2012 年 4 ~ 7 月 DOC 入库总量呈增加的趋势，2012 年 8 月 DOC 入库总量有明显的减少，DOC 入库总量与入库流量具有相似的变化趋势. DOC 最高入库总量出现在夏季，最低入库总量出现在冬季，季节变化差异显著：夏季(1.19×10^9 kg) > 次年夏季(1.05×10^9 kg) > 秋季(3.64×10^8 kg) > 次年春季(2.94×10^8 kg) > 春季(1.93×10^8 kg) > 冬季(5.23×10^7 kg)，采用两年的春季($n = 20$)、夏季($n = 20$)的数据和 2011 年秋季($n = 12$)、冬季($n = 11$)的数据(下同)，入库总量的季节差异显著性比较结果：夏季极显著高于其他季节($P < 0.01$). 三峡库区 DOC 年入库总量为 1.78×10^9 kg，远大于黄河小浪底水库 9.0×10^7 kg 值[15]，而与林晶等[8]对长江 DOC 年入库总量的研究结果(2003 年，1.32×10^9 kg；2004 年，1.20×10^9 kg)相比，分别增加了 34.85%、48.33%. 黄河水体比长江的浊度高，水体中有机质多以颗粒态存在，而三峡水库蓄水以后水流变缓，水动力减弱，水库对颗粒物的拦截作用增加了颗粒物在库区的停留时间，在环境微生物的分解作用下有利于颗粒态有机质向溶解态转化[17]，这可能导致 DOC 入库总量的明显

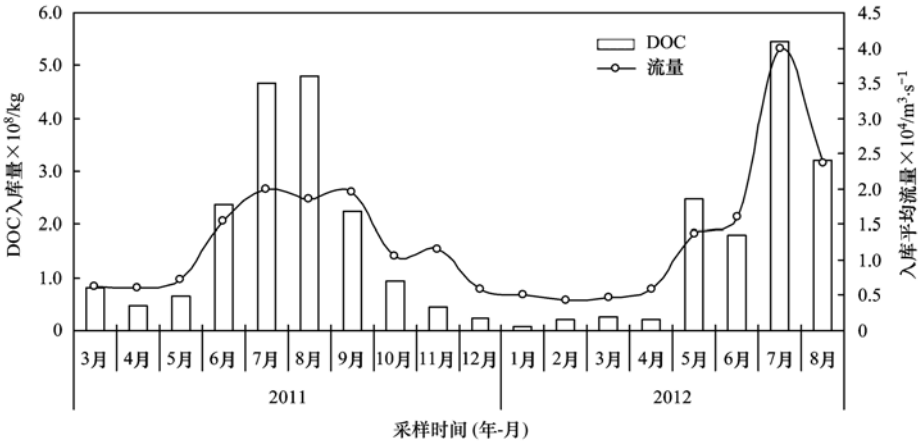

图 1 三峡库区入库流量及 DOC 逐月入库量

Fig. 1 Water flow and DOC input in the Three Gorges Reservoir from month to month

增加.

2.2 三峡库区水中可溶性氮浓度及其入库总量的变化

如表 1 所示,DTN 浓度范围为 2.59 ~ 4.35 $mg \cdot L^{-1}$,平均浓度为(3.52 ± 0.46) $mg \cdot L^{-1}$,最大浓度和最小浓度分别出现在 2011 年 4 月、2012 年 8 月. DTN 的季节变化特征:春季[(4.13 ± 0.20) $mg \cdot L^{-1}$] > 次年春季[(3.64 ± 3.32) $mg \cdot L^{-1}$] > 冬季[(3.55 ± 0.24) $mg \cdot L^{-1}$] > 夏季[(3.52 ± 0.46) $mg \cdot L^{-1}$] > 次年夏季[(3.21 ± 0.58) $mg \cdot L^{-1}$] > 秋季[(3.07 ± 0.11) $mg \cdot L^{-1}$],春季显著高于夏季和秋季(方法同 2.1 节),$P < 0.05$,季节变化特征显著. 总体上来看,春季-夏季-秋季水中 DTN 浓度呈下降的趋势,秋季-冬季-春季水中 DTN 浓度呈上升的趋势,与郭胜等[14]对三峡干流氮素变化趋势的研究结果相同. 图 2 为库区水中可溶性氮的入库总量和库区的入库流量. 从中可知,DTN 最高入库总量呈夏季高于冬季、春季秋季次之的变化趋势:夏季(5.13×10^8 kg) > 次年夏季(7.01×10^8 kg) > 秋季(3.29×10^8 kg) > 次年春季(2.49×10^8 kg) > 春季(2.27×10^8 kg) > 冬季(1.43×10^8 kg),季节变化明显.

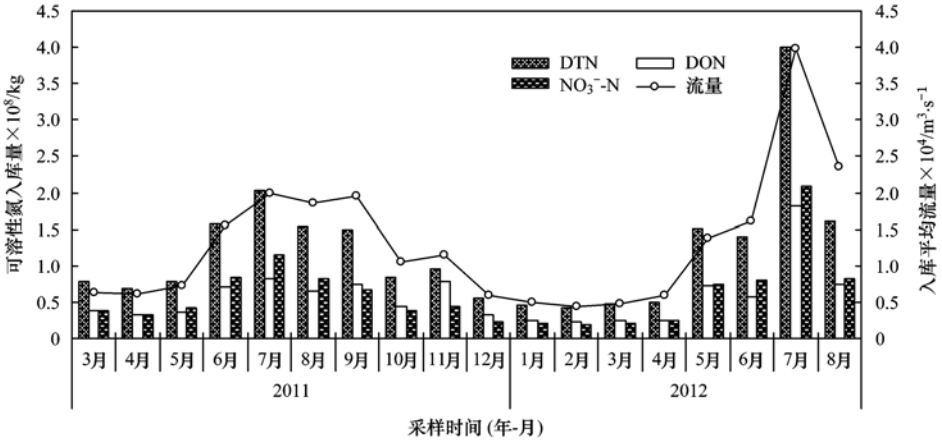

图 2 三峡库区入库流量及可溶性氮逐月入库量(除NH_4^+-N)

Fig. 2 Water flow and dissolved nitrogen input in the Three Gorges Reservoir from month to month(except NH_4^+-N)

NO_3^--N浓度范围为 1.34 ~ 2.15 $mg \cdot L^{-1}$,平均浓度为(1.72 ± 0.28) $mg \cdot L^{-1}$,最大浓度和最小浓度分别出现在 2011 年 7 月、2012 年 8 月. NO_3^--N 的季节变化特征:春季[(2.06 ± 0.06) $mg \cdot L^{-1}$] > 夏季[(1.94 ± 0.28) $mg \cdot L^{-1}$] > 次年夏季[(1.71 ± 0.33) $mg \cdot L^{-1}$] > 次年春季[(1.70 ± 0.16) $mg \cdot L^{-1}$] > 冬季[(1.52 ± 0.13) $mg \cdot L^{-1}$] > 秋季[(1.39 ± 0.03) $mg \cdot L^{-1}$],秋季显著低于春季和夏季(方法同 2.1 节),$P < 0.05$. 总体上,NO_3^--N与 DTN 具有相同的季节变化趋势,春季-夏季-秋季水中NO_3^--N浓度

呈下降趋势，秋季-冬季-春季水中 DTN 浓度呈上升趋势. NO_3^--N最高入库总量与 DTN 的变化趋势相同：次年夏季(3.14×10^8 kg) > 夏季(2.18×10^8 kg) > 秋季(1.97×10^8 kg) > 次年春季(1.23×10^8 kg) > 春季(1.08×10^8 kg) > 冬季(8.05×10^7 kg)，季节变化明显.

DON 浓度范围为 1.21 ~ 2.47 $mg\cdot L^{-1}$，最大浓度和最小浓度分别出现在 2011 年 4 月、2012 年 8 月，平均浓度为(1.75 ± 0.33) $mg\cdot L^{-1}$. 总体上来看，DON 与 DTN 的季节变化趋势不同：冬季-春季-夏季水中 DON 呈下降的趋势，夏季-秋季-冬季水中 DON 呈上升的趋势. DON 的季节变化特征：冬季[(1.98 ± 0.10) $mg\cdot L^{-1}$] > 春季[(1.92 ± 0.14) $mg\cdot L^{-1}$] > 次年春季[(1.86 ± 0.21) $mg\cdot L^{-1}$] > 秋季[(1.83 ± 0.55) $mg\cdot L^{-1}$] > 夏季[(1.48 ± 0.23) $mg\cdot L^{-1}$] > 次年夏季[(1.43 ± 0.25) $mg\cdot L^{-1}$]，夏季显著低于春季和冬季(方法同 2.1 节)，$P<0.05$. DON 最高入库总量与 DTN 的变化趋势相同(方法同 2.1 节)：次年夏季(3.72×10^8 kg) > 夏季(2.82×10^8 kg) > 秋季(1.49×10^8 kg) > 次年春季(1.20×10^8 kg) > 春季(1.11×10^8 kg) > 冬季(6.16×10^7 kg)，季节变化显著.

NH_4^+-N浓度范围为 0.05 ~ 0.14 $mg\cdot L^{-1}$，平均浓度为(0.09 ± 0.03) $mg\cdot L^{-1}$，与王婧等[18]在汉江上游金水河的研究结果(0.25 $mg\cdot L^{-1}$)相比，三峡库区水中NH_4^+-N浓度较低. 在整个观测期间库区水中NH_4^+-N浓度 100% 达到国家地表水Ⅱ类标准(≤0.5 $mg\cdot L^{-1}$)，其中 94.5% 达到国家地表水Ⅰ类标准(≤0.15 $mg\cdot L^{-1}$). NH_4^+-N的季节变化特征：春季[(0.11 ± 0.04) $mg\cdot L^{-1}$] > 次年春季[(0.09 ± 0.01) $mg\cdot L^{-1}$]、秋季[(0.09 ± 0.02) $mg\cdot L^{-1}$]、夏季[(0.09 ± 0.04) $mg\cdot L^{-1}$] > 冬季[(0.07 ± 0.02) $mg\cdot L^{-1}$] > 次年夏季[(0.06 ± 0.02) $mg\cdot L^{-1}$]，四季差异不明显(方法同 2.1 节). NH_4^+-N最高入库总量出现在 2012 年夏季，最低入库总量出现在 2011 年冬季，季节变化差异显著：次年夏季(1.45×10^7 kg) > 夏季(1.35×10^7 kg) > 秋季(1.09×10^7 kg) > 次年春季(6.27×10^6 kg) > 春季(5.16×10^6 kg) > 冬季(2.67×10^6 kg)，夏季为全年的最高值.

3　讨论

3.1　三峡库区水中 DOC 浓度及其入库总量的季节变化

DOC 是联系陆地和水体两生态系统最活跃的碳素物质，水中 DOC 按其来源可分为内源和外源两种[19, 20]：外源 DOC 主要来自地表植物残骸的分解，土壤中有机物的降解以及人为源的排放；内源 DOC 主要来自水体生态系统的现场产生. 相关性分析结果显示，DOC 浓度、入库总量与库区温度、流量均呈现极显著正相关关系($P<0.01$，$n=66$)，温度、入库流量对水中 DOC 的季节性变化影响很大. 温度影响 DOC 的产生量，而入库流量的变化主要表现在对流域降水的响应，外源 DOC 是通过地表径流的侵蚀冲刷进入水体，即温度、降水对水中 DOC 的季节性变化影响很大.

区域地处亚热带温润季风气候，春季温度范围 11.9 ~ 25.3℃，温度逐渐上升，植物开始生长，降水逐渐增多，流域土壤侵蚀作用增强，随地表径流汇入水中的 DOC 增加[21]. 春季入库流量对 DOC 浓度和入库总量均呈极显著正相关关系($P<0.01$，$n=20$)，这表明春季的降水对 DOC 浓度的升高和入库总量的增多有促进作用. 如表 1 和图 1 中，2012 年 5 月 DOC 浓度、DOC 总输入量分别约是 2011 年 5 月的 2 倍、2.8 倍，这是由于 2012 年 5 月流域降水偏多引起入库流量的明显增加，导致 DOC 浓度和入库总量均显著高于 2011 年 5 月($P<0.01$).

夏季温度范围 21.63 ~ 33.95℃，平均温度为全年最高，雨热同期，植物生长旺盛，土壤中微生物代谢强烈，大量外源 DOC 在降水的冲刷作用下通过地表径流大量进入库区水体中，使 DOC 浓度和入库总量均达到全年的最高值. 但夏季水中 DOC 浓度稳定性较差，针对实验期间 DOC 浓度极值的分析发现，DOC 浓度的升高与强降水、入库流量的增加在时间段上基本是吻合的. 但 2012 年夏季 DOC 入库总量与流量相关性不显著($P>0.05$，$n=11$)，对比两年夏季的 DOC 发现，2012 年浓度显著低于 2011 年，约下降一半；2012 年入库总量比 2011 年约降低 11.83%. 尤其是 2012 年 8 月，DOC 浓度、入库流量同期相比均下降明显，其主要原因可能是：一方面，2012 年 7 月相对频繁的降雨冲刷引起地表植物残体的大量减少以及深层贫瘠土壤的裸露，导致流域内 DOC 含量相对降低；另一方面，2012 年夏季强降雨，流量增加约 47.01%，大量雨水的汇入对水中 DOC 的稀释作用增强[22].

秋季温度范围 13.35 ~ 26.6℃，DOC 浓度、入库总量随入库流量的减小而呈下降趋势，10 月入库流量比 9 月下降约 46.35%，水中 DOC 浓度比 9 月下降约 29.36%，而 DOC 入库总量比 9 月下降约

57.86%,即 10 月 DOC 浓度和入库总量都大大地减少. 有研究表明[23,24],在实验装置内淹水浸泡状态下,消落带草本植物在短期内(15 d 左右)会向上覆水中大量释放 DOC,引起上覆水 DOC 浓度的升高. 10 月汛末库区水位迅速上升,然而水中 DOC 浓度并没有出现大幅升高的现象,这可能是因为蓄水后水体稀释消落区所释放的 DOC,这说明了消落区淹没释放的 DOC 对库区水中的 DOC 贡献不大. 11 月随着流域降水和入库流量的减少,DOC 浓度、入库流量较10 月都有进一步的降低、减少. 但浓度与入库流量相关性不显著($P>0.05$,$n=12$),说明降水对水体中 DOC 的影响减弱,外源 DOC 贡献率降低. 有研究表明[25],秋季水中现场产生的 DOC 增加. 秋季库区蓄水后温度在 20℃左右,缓慢的水流和适宜的温度都有利于微生物的生长,内源贡献率可能有所增加.

冬季水中 DOC 浓度和入库总量均是全年的最低值,且无明显的浓度变化. DOC 浓度、入库总量随入库流量的减少呈降低的趋势,两者与入库流量相关性均不显著,$P>0.05$($n=11$),结果表明,冬季少雨,降水对水体中 DOC 的影响进一步减弱,外源 DOC 输入的大大减少,而且冬季库区温度范围 7.6 ~12.5℃,低温将导致现场产生的 DOC 进一步减少.

3.2 三峡库区水中可溶性氮浓度及其入库总量的季节变化

水体中可溶性氮主要来自点源(工业、生活污水)排放[26]、面源(流域侵蚀)排放[27,28]、湿沉降[22]和水生态系统现场产生[29]. 在时空上点源排放相对稳定,而其他排放方式具有明显的季节性特征. 库区水中 DTN 浓度的季节变化特征为春季 > 冬季 > 夏季 > 秋季,春季 DTN 浓度为全年最高,分别约是夏季、秋季、冬季的 1.1 倍、1.3 倍、1.09 倍. 春季、冬季降雨少,库区入库流量较小,夏季、秋季多雨,流量较大,而春季、冬季水中 DTN 浓度高于夏季、秋季,这说明流域内城镇生活污水等点源排放对 DTN 的影响很大,但春季和冬季 DTN 入库总量分别占全年的 18.43% 和 10.89%,所占比例不高. 春季、冬季水中 DTN 出现高浓度低入库总量的现象,一方面,降水少入库流量低,水体对点源排放的 DTN 的稀释作用减弱,导致水中 DTN 浓度偏高; 另一方面,在降雨较少的季节地表径流携带入库的 DTN 也会随之减少,这可能是 DTN 入库总量较低的原因之一.

DTN 与入库流量之间存在响应,即受流域降雨影响,分析 DTN 及其各组分与入库流量的相关性结果发现,DON 浓度随入库流量的增加而减小,呈显著负相关关系($P<0.05$,$n=64$),而 DTN、NO_3^--N 和NH_4^+-N浓度与入库流量的相关性均不显著. DTN 及其各组分的入库总量与入库流量,均呈极显著正相关($P<0.01$,$n=64$). DTN 及其各组分浓度与温度的相关性:DTN、DON 浓度均随温度的升高而降低,分别呈显著负相关($P<0.05$,$n=64$)和极显著负相关关系($P<0.01$,$n=64$),而NO_3^--N、NH_4^+-N 浓度与温度的相关关系均不显著($P>0.05$,$n=64$).

水中 DON、NO_3^--N分别占 DTN 的 30.35% ~ 63.45%、35.87% ~67.72%,是 DTN 的主要成分,而NH_4^+-N 含量低,仅占 0.95% ~5.39%. DTN 中 DON、NO_3^--N的比例有明显的季节性变化:春季、夏季NO_3^--N浓度高于 DON,秋季、冬季 DON 浓度高于NO_3^--N. 表 2 为实验期间可溶性氮浓度之间的相关性分析结果. 从中可知,水中 NO_3^--N、DON、NH_4^+-N与 DTN 均呈极显著正相关; NO_3^--N、DON、NH_4^+-N三者之间,仅NO_3^--N与NH_4^+-N之间呈显著正相关,DON 与NO_3^--N、NH_4^+-N相关性均不显著. 这表明,在实验期间水中稳定态氮NO_3^--N与还原态氮NH_4^+-N之间存在共同的迁移转化途径,而 DON 与NO_3^--N、NH_4^+-N之间具有不同的物质迁移转化途径或受不同环境因素的影响.

表 2 水中可溶性氮浓度的相关系数1)($n=64$)

Table 2 Correlation coefficient for dissolved nitrogen concentration in the water($n=64$)

	DTN	DON	NO_3^--N	NH_4^+-N
DTN	1	0.489**	0.793**	0.325**
DON		1	0.008	0.001
NO_3^--N			1	0.298*
NH_4^+-N				1

1) ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

春季温度较低,DTN 浓度达到全年的最高值,水中 NO_3^--N、DON 含量相当,分别占 47.69%、47.53%. 冬季 DTN 浓度低于春季($P>0.05$),NO_3^--N、DON 分别占 56.10%、42.88%,DON 含量高于NO_3^--N. 与春季相比,冬季水中NO_3^--N浓度低于春季,DON 浓度高于春季. 春季农户集中施肥,地表径流往往含有较高浓度的NO_3^--N[26],汇入水体后引起NO_3^--N浓度的升高,此外,春季NH_4^+-N浓度为

全年的最高值，城镇生活污水一般以NH_4^+-N的形式排放[12]，部分NO_3^--N可能来自NH_4^+-N的氧化转化. 冬季流量达到全年最低值，蓄水以后水面开阔水流平缓，水力停留时间长，水体中现场产生的内源 DON 增多[25]，而NO_3^--N浓度的降低可能与水生浮游植物的生长吸收有关[30]. 冬季来自外源输入的 DTN 大大减少，DTN 入库总量为全年最低，春季雨水相对较多，DTN 入库总量是冬季的 1.8 倍.

夏季温度全年最高，DTN 的浓度较低（高于秋季），与春季相比，夏季水中 DTN 浓度有显著的下降（$P<0.05$），说明点源排放对水中 DTN 的影响减小，降雨导致地表径流增多. 有研究表明，流域湿沉降不是 DTN 的主要来源[22]，一方面，降水稀释点源排放的 DTN；另一方面，夏季流域侵蚀作用增强，导致 DTN 入库总量的增加，入库总量占全年的 46.06%. 夏季水中 DON 浓度显著低于春季和冬季（$P<0.05$），为全年的最低值，这一结果与沈志良等[11]对长江 DON 的研究结果一致. 这可能是因为：一方面，DON 浓度与温度呈极显著负相关关系，夏季高温，水中部分 DON 被氧化；另一方面，消落带土壤有机碳与全氮的比值（C/N）较低[31]，土壤的 C/N 决定着土壤氮素矿化-微生物固定转化能力，比较低的 C/N 说明土壤有机质的腐殖化程度很高，有机氮容易矿化，进而导致 DON 在土壤中的浓度不高，使得流失到水体中的 DON 浓度低. 此外，DON 浓度与入库流量呈显著负相关（$P<0.05$，$n=12$），降水对 DON 的稀释作用也不容忽视.

秋季 DTN 浓度为全年最低，水中 DTN、NO_3^--N 浓度呈降低的趋势，DON 浓度与 DTN、NO_3^--N的变化趋势不同，呈升高的趋势，水中NO_3^--N、DON 分别占 46.74%、61.72%，DON 对 DTN 的贡献率超过NO_3^--N. 秋季三峡大坝开始蓄水，水位上涨，库区水流变缓，水中颗粒物沉积，水体透明度增加，水生态系统现场产生的 DON 增加，而水生植物大量生长直接吸收硝态氮[30]，使NO_3^--N浓度大幅度降低，进而导致 DTN 浓度的降低.

3.3　溶解性有机碳氮的来源特征

DOC 与 DON 呈显著负相关关系（$P<0.05$，$n=66$），DOC 与 DON 之间存在一定的联系. DOC 和 DON 是水中 DOM 的主要组成部分[5,32]，DOC/DON 可以反映水中 DOM 的碳氮比及其来源. 库区水中 DOC/DON 的范围为 0.35～7.28，最大 C/N 出现在 2011 年 8 月，最小 C/N 出现在 2012 年 1 月，春季到夏季 DOC/DON 比值逐渐升高，夏季达到最大值，秋季到冬季 DOC/DON 比值逐渐降低，春夏秋冬季 DOC/DON 的范围分别是 0.85～3.64、2.89～7.28、0.45～3.35、0.35～0.86. 有研究表明，来自有机化肥、污水以及内源派生产物等非腐殖质和脂肪族的物质，通常具有较低的 DOC/DON 值，在 2.6～4.3 之间[33,34]；来自土壤和地表高等植物的高分子 DOM，其 DOC/DON 值比前者高[5,16]，但在化学生物过程中 DOC/DON 值会发生一定的变化[35]. 因此，根据上文的分析结果及四季 DOC/DON 数据对水中 DOM 的来源进行粗略的说明，冬季 DOC/DON 比值较低，DOM 含氮量较高，表明水中 DOM 可能来自城镇生活污水排放及内源现场产生，而冬季库区温度较低，水中微生物活动缓慢，内源产生的减少，城镇生活污水排放是 DOM 的主要来源；夏季 DOC/DON 比值较高，DOM 含氮量较低，表明流域侵蚀对水中 DOM 的贡献更大；春季、秋季 DOC/DON 比值介于冬季、夏季之间，水中 DOM 的来源包括城镇生活污水、流域侵蚀及现场产生.

4　结论

（1）三峡库区水中 DOC 浓度与入库总量具有相似的变化趋势，季节变化特征明显：夏季＞春季、秋季＞冬季. DOC 浓度、入库总量均与入库流量和温度呈极显著正相关关系（$P<0.01$），受温度、流域降水影响较大，且 DOC 年入库总量较先前的研究结果有明显的增加.

（2）三峡库区水中 DTN 浓度的季节变化特征：春季＞冬季＞夏季＞秋季；入库流量的季节变化特征：夏季＞秋季＞春季＞冬季. DTN 浓度与温度呈显著负相关关系（$P<0.05$），与入库流量呈弱的负相关关系（$P>0.05$），主要受温度的影响，入库流量对浓度的影响较小. DTN 入库总量与入库流量呈极显著正相关关系（$P<0.01$），主要来自流域侵蚀过程.

（3）三峡库区水中NO_3^--N浓度受人为排放影响较大，其季节变化：春季＞夏季＞冬季＞秋季. DON 浓度与温度的呈极显著负相关性（$P<0.01$），与入库流量呈显著负相关（$P<0.05$），受高温氧化和降水的稀释作用明显，其季节变化：冬季＞春季＞秋季＞夏季. NO_3^--N、DON 入库总量的季节变化相同：夏季＞秋季＞春季＞冬季.

（4）三峡库区水中 DTN 的主要成分为NO_3^--N、DON. NO_3^--N与NH_4^+-N之间存在相互的转化，DON 与NO_3^--N、NH_4^+-N相关性不显著，可能是由于迁移

转化过程较复杂或者影响因素不同. DOC 与 DTN、NO_3^--N、NH_4^+-N 的相关性不显著, DOC 与 DTN、NO_3^--N、NH_4^+-N之间没有直接的联系. 水中 DOC 与 DON 呈显著负相关, DOC/DON 比值的变化表明水中 DOM 来源季节变化特征明显.

参考文献:

[1] Ludwig W, Probst J L, Kempe S. Predicting the oceanic input of organic carbon by continental erosion[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1996, **10**(1): 23-41.

[2] Valigura R A, Alexander R B, Castro M S, *et al*. Nitrogen loading in coastal water bodies: an atmospheric perspective[M]. American: American Geophysical Union, 2012. 1-252.

[3] 柳敏, 宇万太, 姜子绍, 等. 土壤溶解性有机碳(DOC)的影响因子及生态效应[J]. 土壤通报, 2007, **38**(4): 758-764.
Liu M, Yu W T, Jiang Z S, *et al*. Influencing factors and ecological effects of dissolved organic carbon in soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, **38**(4): 758-764.

[4] 黄泽春, 陈同斌, 雷梅, 等. 陆地生态系统中水溶性有机质的环境效应[J]. 生态学报, 2002, **22**(2): 259-269.
Huang Z C, Chen T B, Lei M, *et al*. Environmental effects of dissolved organic matters in terrestrial ecosystems: a review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, **22**(2): 259-269.

[5] Westerhoff P, Mash H. Dissolved organic nitrogen in drinking water supplies: a review[J]. Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA, 2002, **51**(8): 415-448.

[6] Mekinia J, Stensel H D, Czerwionka K, *et al*. Nitrogen transformations and mass balances in anaerobic/anoxic/aerobic batch experiments with full-scale biomasses from BNR activated sludge systems[J]. Water Science and Technology, 2009, **60**(9): 2463-2470.

[7] 陈雪霜, 江韬, 卢松, 等. 三峡库区消落带水体 DOM 不同分子量组分三维荧光特征[J]. 环境科学, 2016, **37**(3): 884-892.
Chen X S, Jiang T, Lu S, *et al*. Three-dimensional fluorescence spectral characteristics of different molecular weight fractionations of dissolved organic matter in the Water-level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas[J]. Environmental Science, 2016, **37**(3): 884-892.

[8] 林晶, 吴莹, 张经, 等. 长江有机碳通量的季节变化及三峡工程对其影响[J]. 中国环境科学, 2007, **27**(2): 246-249.
Lin J, Wu Y, Zhang J, *et al*. Seasonal variation of organic carbon fluxes in the Yangtze River and influence of Three-Gorges engineering[J]. China Environmental Science, 2007, **27**(2): 246-249.

[9] 刘秀娟, 俞志明, 宋秀贤, 等. 长江口海域悬浮颗粒有机物的稳定氮同位素分布及其生物地球化学意义[J]. 海洋科学, 2010, **34**(1): 11-17.
Liu X J, Yu Z M, Song X X, *et al*. Distribution in the stable nitrogen isotope of the suspended particulate organic matter in the Yangtze River (Changjiang) estuary, China and its biogeochemistry implications[J]. Marine Science, 2010, **34**(1): 11-17.

[10] 邢建伟, 线薇薇, 沈志良, 等. 秋季长江口水体颗粒有机碳年际变化及影响因素分析[J]. 海洋与湖沼, 2014, **45**(5): 964-972.
Xing J W, Xian W W, Shen Z L, *et al*. Interannual variation of particulate organic carbon and its influencing factors in Changjiang River estuary in autumn[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2014, **45**(5): 964-972.

[11] 沈志良, 刘群, 张淑美. 长江总氮和有机氮的分布变化与迁移[J]. 海洋与湖沼, 2003, **34**(6): 577-585.
Shen Z L, Liu Q, Zhang S M. Distribution, variation and removal patterns of total nitrogen and organic nitrogen in the Changjiang River[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2003, **34**(6): 577-585.

[12] 郑丙辉, 曹承进, 秦延文, 等. 三峡水库主要入库河流氮营养盐特征及其来源分析[J]. 环境科学, 2008, **29**(1): 1-6.
Zheng B H, Cao C J, Qin Y W, *et al*. Analysis of nitrogen distribution characters and their sources of the major input rivers of Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Science, 2008, **29**(1): 1-6.

[13] 张晟, 郑坚, 刘婷婷, 等. 三峡水库入库支流水体中营养盐季节变化及输出[J]. 环境科学, 2009, **30**(1): 58-63.
Zhang S, Zheng J, Liu T T, *et al*. Seasonal variation and output of nutrient in tributaries of three gorges reservoir[J]. Environmental Science, 2009, **30**(1): 58-63.

[14] 郭胜, 李崇明, 郭劲松, 等. 三峡水库蓄水后不同水位期干流氮、磷时空分异特征[J]. 环境科学, 2011, **32**(5): 1266-1272.
Guo S, Li C M, Guo J S, *et al*. Spatio-temporal variation of nitrogen, phosphorus in different period in Three Gorges Reservoir after its impoundment[J]. Environmental Science, 2011, **32**(5): 1266-1272.

[15] 张永领, 王明仕, 董玉龙. 黄河小浪底水库水沙调控对 DOC 输送的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(4): 1249-1255.
Zhang Y L, Wang M S, Dong Y L. Effect of the runoff-sediment control of the Xiaolangdi Reservoir on DOC transport[J]. Environmental Science, 2015, **36**(4): 1249-1255.

[16] Thurman E M. Organic geochemistry of natural waters[M]. Netherlands: Springer, 1985.

[17] Fettweis M, Baeye M, Lee B J, *et al*. Hydro-meteorological influences and multimodal suspended particle size distributions in the Belgian nearshore area(southern North Sea)[J]. Geo-Marine Letters, 2012, **32**(2): 123-137.

[18] 王婧, 袁洁, 谭香, 等. 汉江上游金水河悬浮物及水体碳氮稳定同位素组成特征[J]. 生态学报, 2015, **35**(22): 7338-7346.
Wang J, Yuan J, Tan X, *et al*. Stable isotope composition of particulate organic matters and dissolved nitrate in the Jinshui River, Upper Han River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, **35**(1): 7338-7346.

[19] Hong H S, Yang L Y, Guo W D, *et al*. Characterization of dissolved organic matter under contrasting hydrologic regimes in a subtropical watershed using PARAFAC model[J]. Biogeochemistry, 2012, **109**(1): 163-174.

[20] 鲍红艳. 溶解态和颗粒态陆源有机质在典型河流和河口的来源、迁移和转化[D]. 上海: 上海华东师范大学, 2012. 1-170.
Bao H Y. The sources, transportations and transformations of dissolved and particulate terrestrial organic matter in typical river and estuary systems[D]. Shanghai: East China Normal University, 2012. 1-170.

[21] 李振炜，于兴修，刘前进，等. 沂蒙山区典型小流域特殊降雨的磷素输出特征[J]. 环境科学，2012，**33**(4)：1152-1158.
Li Z W，Yu X X，Liu Q J，*et al*. Output characteristics of non-point phosphorus from a typical small watershed in Yimeng Mountainous Area under the special rainfall[J]. Environmental Science，2012，**33**(4)：1152-1158.

[22] 王金杰，张克荣，吴川，等. 汉江上游金水河流域氮湿沉降[J]. 环境科学，2014，**35**(1)：66-72.
Wang J J，Zhang K R，Wu C，*et al*. Wet deposition of atmospheric nitrogen of the Jinshui Watershed in the upper Hanjiang River[J]. Environmental Science，2014，**35**(1)：66-72.

[23] 王建超，朱波，汪涛，等. 三峡库区典型消落带草本植物氮磷养分浸泡释放实验[J]. 环境科学，2012，**33**(4)：1144-1151.
Wang J C，Zhu B，Wang T，*et al*. Nitrogen and phosphorus release from herbaceous vegetation under simulated inundation experiment of Water-level Fluctuation Zone in the Three Gorges Reservior Area[J]. Environmental Science，2012，**33**(4)：1144-1151.

[24] 杜立刚，方芳，郭劲松，等. 三峡库区消落带草本植物碳氮磷释放及影响因素[J]. 环境科学研究，2014，**27**(9)：1024-1031.
Du L G，Fang F，Guo J S，*et al*. Characteristics of carbon，nitrogen and phosphorus release from dominant herbaceous plants in Water-level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir[J]. Research of Environmental Sciences，2014，**27**(9)：1024-1031.

[25] 倪兆奎，王圣瑞，赵海超，等. 洱海入湖河流水体悬浮颗粒物有机碳氮来源特征[J]. 环境科学研究，2013，**26**(3)：287-293.
Ni Z K，Wang S R，Zhao H C，*et al*. The sources of organic carbon and nitrogen of suspended particulate matter in inflow river of Erhai Lake[J]. Research of Environmental Sciences，2013，**26**(3)：287-293.

[26] 蔡崇法，丁树文，史志华，等. GIS 支持下三峡库区典型小流域土壤养分流失量预测[J]. 水土保持学报，2001，**15**(1)：9-12.
Cai C F，Ding S W，Shi Z H，*et al*. Prediction on soil nutrients losses at typical small watershed of Three Gorges Area with GIS[J]. Journal of Soil and Water Conservation，2001，**15**(1)：9-12.

[27] 林彬，冯明磊，胡荣桂，等. 三峡库区小流域农户氮循环和排放特征[J]. 环境科学，2010，**31**(3)：632-638.
Lin B，Feng M L，Hu R G，*et al*. Characteristics of nitrogen cycling in farm systems in a small watershed of Three Gorges Reservoir Area，China[J]. Environmental Science，2010，**31**(3)：632-638.

[28] 郑少文，郭智，王子臣，等. 太湖流域典型蔬菜地氮素径流流失特征[J]. 水土保持学报，2014，**28**(3)：204-208.
Zheng S W，Guo Z，Wang Z C，*et al*. Characteristics of nitrogen losses by surface runoff in the typical vegetable field of Taihu Lake basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation，2014，**28**(3)：204-208.

[29] 王莲阁，高岩红，丁长欢，等. 三峡库区典型消落带土壤有机碳分布特征[J]. 西南大学学报(自然科学版)，2015，**37**(3)：120-124.
Wang L G，Gao Y H，Ding C H，*et al*. Distribution characteristics of soil organic carbon in a typical Water-level-Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition)，2015，**37**(3)：120-124.

[30] Reid N J，Hamilton S K. Controls on algal abundance in a eutrophic river with varying degrees of impoundment (Kalamazoo River，Michigan，USA)[J]. Lake and Reservoir Management，2007，**23**(3)：219-230.

[31] 曾巾，杨柳燕，肖琳，等. 湖泊氮素生物地球化学循环及微生物的作用[J]. 湖泊科学，2007，**19**(4)：382-389.
Zeng J，Yang L Y，Xiao L，*et al*. Biogeochemical cycling of nitrogen in lakes and the role of microorganisms in conversion of nitrogen compounds[J]. Journal of Lake Sciences，2007，**19**(4)：382-389.

[32] Choi J，Valentine R L. Formation of *N*-nitrosodimethylamine (NDMA) from reaction of monochloramine：a new disinfection by-product[J]. Water Research，2002，**36**(4)：817-824.

[33] Campbell J L，Hornbeck J W，McDowell W H，*et al*. Dissolved organic nitrogen budgets for upland，forested ecosystems in New England[J]. Biogeochemistry，2000，**49**(2)：123-142.

[34] Cifuentes L A，Coffin R B，Solorzano L，*et al*. Isotopic and elemental variations of carbon and nitrogen in a mangrove estuary[J]. Estuarine，Coastal and Shelf Science，1996，**43**(6)：781-800.

[35] Owens N J P. Variations in the natural abundance of $^{N}15$ in estuarine suspended particulate matter：a specific indicator of biological processing[J]. Estuarine，Coastal and Shelf Science，1985，**20**(4)：505-510.

HUANJING KEXUE Vol. 38 No. 1
Environmental Science (monthly) Jan. 15, 2017

CONTENTS

《环境科学》第6届编辑委员会

环境科学

（HUANJING KEXUE）

（月刊　1976年8月创刊）

2017年1月15日　第38卷　第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 38　No. 1　Jan. 15, 2017

主　管	中国科学院	**Superintended** by	Chinese Academy of Sciences
主　办	中国科学院生态环境研究中心	**Sponsored** by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协　办	（以参加先后为序） 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	**Co-Sponsored** by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主　编	赵进才	**Editor-in -Chief**	ZHAO Jin-cai
编　辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱（海淀区双清路18号，邮政编码：100085） 电话：010-62941102，010-62849343 传真：010-62849343 E-mail：hjkx@rcees.ac.cn http://www.hjkx.ac.cn	**Edited** by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@rcees.ac.cn http://www.hjkx.ac.cn
出　版	科学出版社 北京东黄城根北街16号 邮政编码：100717	**Published** by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印刷装订	北京宝昌彩色印刷有限公司	**Printed** by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
发　行	科学出版社 电话：010-64017032 E-mail：journal@mail.sciencep.com	**Distributed** by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@mail.sciencep.com
订 购 处	全国各地邮电局	**Domestic**	All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 （北京399信箱）	**Foreign**	China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号：ISSN 0250-3301 / CN 11-1895/X　　**国内邮发代号**：2-821

国内定价：140.00元　　**国外发行代号**：M 205

国内外公开发行

ISSN 0250-3301