

三峡库区小流域河流可溶性硅、无机氮和磷的研究

张少源¹, 冯明磊¹, 林杉¹, 覃德富², 胡荣桂^{1*}, 杨小文¹, 姜诚²

(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: 利用定点监测的方法对三峡库区 2 个小流域水体中可溶性硅(DSi)、可溶性无机氮(DIN)和可溶性磷(DP)含量及其变化规律进行了研究, 分析了三者之间的比例关系及可能引起的环境问题. 结果表明, 2006 年宝塔河流域和曲溪流域 DSi 含量在 $0.18 \sim 19.89 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, DIN 含量在 $0.39 \sim 6.85 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 枯水季节含量高于丰水季节; DP 含量在 $0.01 \sim 0.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 无明显季节性变化. 曲溪流域水体中 DSi、DIN 的含量明显高于宝塔河, 这可能与当地的农户活动、土地利用类型、施肥量等因素有关; 而 DP 含量在两流域间无明显差异, 具体影响因素还有待探索. 两流域水体中 DSi、DIN 含量均高于库区水体, DP 含量低于库区. 宝塔河流域水体中的 DSi、DIN 和 DP 的含量比例为 138:81:1, 而曲溪流域为 500:350:1, 从水体营养学角度来看, 两流域营养物质含量比均达到发生“水华”现象的程度, 其水环境问题的潜在威胁值得关注.

关键词: 三峡地区; 可溶性硅; 可溶性无机氮; 可溶性磷

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)10-2716-07

Dissolved Silicon, Inorganic Nitrogen and Phosphorus in the Stream Water of Two Small Watersheds in Three Gorges Area

ZHANG Shao-yuan¹, FENG Ming-lei¹, LIN Shan¹, QIN De-fu², HU Rong-gui¹, YANG Xiao-wen¹, JIANG Cheng²

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

Abstract: By using the method of fixed-pointed monitoring in streams of two small watersheds in Three Gorges Reservoir Area, the contents of dissolved silicon (DSi), dissolved inorganic nitrogen (DIN) and dissolved phosphorus (DP) are analyzed. The seasonal variation, the content ratio of DSi, DIN and DP, and the potential environmental problems are also discussed. The results indicate that: ① In the two rivers, DSi content ranges from 0.18 to 19.89 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, DIN from 0.39 to 6.85 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and both are higher in the dry period than in the wet period; ② DP content is from 0.01 to 0.08 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, which shows no significant difference between the dry and wet period; ③ The contents of DSi and DIN in Quxi River are higher than in Baota River, which may relate with the local agricultural activities, land use/land cover, fertilizer and so on; ④ The contents of DSi, DIN and DP in two small watersheds are all higher than in Three Gorge Reservoir, and the content ratio of DSi, DIN, DP is about 138:81:1 in Baota River, and 500:350:1 in Quxi River, which suggests that more attention should be paid to a potential threat to water environment such as Water-bloom.

Key words: Three Gorges; dissolved silicon; dissolved inorganic nitrogen; dissolved phosphorus

水体富营养化是重要的水环境问题之一, Si、N、P 是富营养化的主要控制性营养元素^[1]. 水体中的 Si 对河流和沿岸生态系统起着重要作用, 也是引起水华的关键元素之一^[2]. 目前, 对水体 Si 的研究主要集中于海域, 而河流、湖泊和水库水体硅酸盐含量的研究甚少. 天然水体中的氮以溶解的氮气(N_2)、铵态氮($\text{NH}_4^+ \cdot \text{N}$)、亚硝酸盐氮($\text{NO}_2^- \cdot \text{N}$)、硝酸盐氮($\text{NO}_3^- \cdot \text{N}$)及有机氮等形式存在, 其中溶解态无机氮(DIN)是水体氮素的主要存在形式^[3]. P 通常被认为是控制水体富营养化的关键营养元素, 减少外源 P 负荷可在一定程度上改善水质^[4]. 随着经济的发展, 人类活动强烈地改变了河流水体中可溶性营养盐的含量^[5]. 研究表明, 由于人类活动的影响, N 和 P 向海岸带的输送量在全球尺度上分别增加了 2.5 和 2.0 倍; 而由于水利工程建设和其他因素造成的水

文变化导致水体中的 Si 含量减少了 50%, 这严重影响了水系统中 Si、N 和 P 含量的比值, 从而破坏了水体生态环境营养平衡, 不利于水生生态系统的良性发展^[6~8].

三峡水利枢纽是世界上第一大水电工程, 三峡水库蓄水后, 长江变成一个河道型水库, 致使库区水流流速变缓, 水位上升, 大量耕地被淹没, 同时在生产生活过程中产生的各种废弃物连同耕地中的 N、P 等营养盐通过江水浸泡进入水体, 增加了库区水体中 N、P 等营养盐含量^[9]. 水体流动缓慢、水体更新周期变长、N 和 P 元素含量的增加等均会使水体发

收稿日期: 2007-10-29; 修订日期: 2008-01-12

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40471131)

作者简介: 张少源(1982~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境生态, E-mail: zh_shaoyuan@sohu.com

* 通讯联系人, E-mail: hronggui@163.com

生富营养化的几率增大,而硅酸盐的变化趋势对库区水体藻类水生物的影响也更为深刻.

本研究通过对三峡库区宝塔河和曲溪小流域水体中可溶性 Si、N 和 P 等营养盐含量的分析,考察库区小流域水体中营养盐含量在丰水和枯水季节的变化规律以及三者的比例关系,探讨当地水环境现状和潜在的问题,以期为库区水环境保护及相关政策的制订提供参考依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区位于三峡水库坝首——秭归县.该县是一个以农业为主的峡江河谷山区县,因受到各种自然和人为因素的影响,生态环境较为脆弱.据 2000 年全国遥感调查,秭归县有水土流失面积 1 335.92 km²,年土壤侵蚀量达 420 万 t.宝塔河流域面积约为 17.7 km²,下游较为平缓,中上游坡度陡峭,土壤为花岗岩母质出露发育的石英砂土;该流域林地的覆盖率达 40%,主要分布在流域的上游部分,农业用地占总面积的 45%左右,居住用地所占面积比例约为 6%.曲溪流域面积约为 9.8 km²,流域内土壤为花岗岩母质出露发育的石英砂土;由于该流域为三峡移民的上迁区域,在大坝建设期间许多林地被用于居住和种植,水田和旱地分别占到总面积的 33%和 18%,茶园和果园分别占到 10%左右,林地覆盖率不到 20%.

1.2 采样与调查

根据该流域内农户的分布情况以及当地地理和水文条件,在各支流和主流的交汇处设置监测点;考虑当地污染源状况以及居民活动等因素的影响,对监测点做了适当调整,具体分布如图 1,宝塔河流域共布置了 14 个监测点,曲溪流域布置了 21 个监测点.水样采集时间为 2006 年 1 月~2006 年 12 月,每月在天气晴好的情况下随机采样 1 次,采样点以 GPS 定位,使用容积为 500 mL 塑料采样瓶进行采集,每采样点取 3 个平行样.采集的样品滴入几滴浓度为 0.8 mol·L⁻¹ 的浓硫酸,密封后带回实验室及时测定.

为了解农户氮肥的施用情况,对该流域内的全部农户进行了调查,在调查中主要收集了农户土地利用类型、面积以及施肥状况等信息.调查资料显示,两流域化肥使用种类基本一致,主要为碳酸氢氨、尿素、复合肥和磷肥等化学肥料.两流域磷肥和其它肥料的施用量分别占施用总量的 10%左右,而

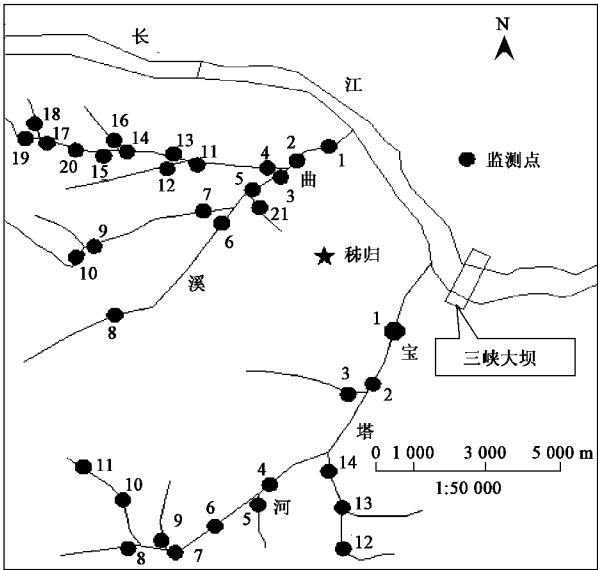


图 1 研究区域位置及监测点分布
Fig.1 Sketch map of study area location and monitor points

氮肥占施肥总量的 80% 以上,是该地区主要肥料(表 1).近 3 年来两流域的施肥量在不同利用类型的土地之间存在很大的差异,水田的施肥量较高,而旱地相对较少,茶园和果园的施肥量逐年增加.近年来该区域内许多农业用地被改造为茶园和果园,而这 2 种类型土地的需肥量是不断增大的,所以两流域整体施肥量呈逐年递增趋势.

表 1 宝塔河和曲溪流域化肥施用情况/kg·hm ⁻²			
Table 1 Fertilizer application in Baota and Quxi watersheds/kg·hm ⁻²			
土地利用类型	2004 年	2005 年	2006 年
林地	—	—	—
水田	810	1 120	1 185
旱地	470	650	714
茶园	523	742	805
果园	624	897	1 102
平均	632	922	1 093

尽管不同年分降水量极不平衡,影响到了河流的水流量,但两流域的降水量和水流量的变化趋势一致(表 2).降水主要集中在 4~9 月份,占到了全年降水量的 75% 以上.考虑到该流域降雨量和水流量的特点,所以在讨论过程中把 4~9 月份划分为丰水季节,1~3 月和 10~12 月份为枯水季节,并把 2 个季节各个月份水体中 DSi、DIN、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 和 DP 含量的平均值作为研究对象进行统计分析和讨论.

1.3 水样分析

DSi 含量采用硅钼黄比色法测定; DP 含量采用

表 2 2006 年宝塔河和曲溪流域降雨量和水流通量
Table 2 Precipitation and water flux in Baota and Quxi watersheds in 2006

月份	宝塔河		曲溪	
	降雨量 /mm	水流通量 /m ³ ·s ⁻¹	降雨量 /mm	水流通量 /m ³ ·s ⁻¹
1	12.75	3.60	12.94	0.48
2	23.82	3.91	22.92	0.52
3	59.71	4.06	57.94	0.54
4	82.54	4.88	81.24	0.65
5	151.36	6.08	141.53	0.81
6	118.34	6.28	123.94	0.77
7	110.65	6.68	110.81	0.89
8	85.77	5.93	87.10	0.79
9	219.62	6.83	221.82	0.91
10	40.39	4.28	40.04	0.57
11	33.54	3.83	32.12	0.51
12	4.86	3.60	3.91	0.48
合计	943.35		936.31	

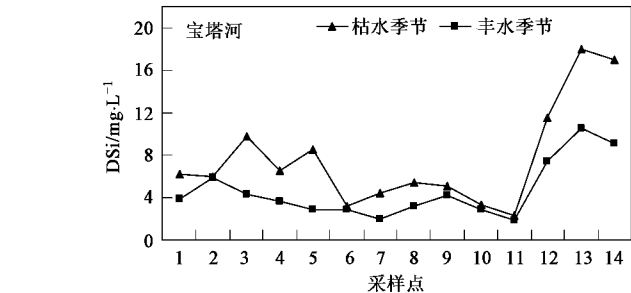
钼锑抗比色法测定; NH_4^+ -N 含量采用纳氏试剂比色法测定; NO_3^- -N 含量运用 flaster5000 流动注射分析仪(铬柱还原法)进行测定; DIN 含量采用过硫酸钾-紫外分光光度仪比色法测定. 课题组以前的研究显示该区域内水体 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 的含量占到 TN 的 95% 以上, 所以本试验没有对其它形态的氮进行研究.

1.4 数据处理

所有结果均以 6 次采样分析结果的平均值表示. 用 AUTOCAD、EXCEL 和 SPSS 等分析工具进行图形和数据的绘制、统计和分析.

2 结果与讨论

2.1 DSi 的变化特征



宝塔河水体 DSi 含量在 $0.18 \sim 19.89 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 平均值为 $4.13 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 而曲溪 DSi 含量在 $0.41 \sim 24.67 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 平均值为 $9.17 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 2). 研究表明, 三峡大坝截留前后长江中上游水体中 DSi 的含量在 $2.58 \sim 5.47 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间^[10]. 宝塔河流域大部分采样点的 DSi 含量与之相近, 而曲溪流域 DSi 含量约为宝塔河的 2 倍. 这可能是因为曲溪流域为三峡水库的新移民区, 新开垦的农业用地比例较大, 水土流失比较严重, 水体含沙量升高所致; 宝塔河不仅没有移民带来的水土流失问题, 且流域内分布着大量的林地和园地, 水土保持状况较好.

宝塔河水体 DSi 含量在枯水季节明显地高于丰水季节, 且该域内的 12、13、14 监测点 DSi 含量显著高于其它各监测点(图 2), 这可能是由于在该支流上农户分布较为集中, 秋、冬季节农户开山淘沙严重. 曲溪流域水体 DSi 含量的季节性变化与宝塔河流域类似, 且在枯水季节各监测点含量普遍在 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上(图 2), 超过同期长江水体平均 DSi 含量($5.60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)^[11], 这可能与当地降雨全年分配不均有关. 有研究指出在基流条件下, 汛期径流量增大时, 水体中营养物质的含量会随之增大, 但是当径流量达到一定数值后, 水体营养物质达到极值, 随后会出现径流量增加而营养物质含量减少的现象^[12, 13], 曲溪水体中的 DSi 含量的变化趋势基本符合以上规律. 在枯水季节水径流量较小, 而人为因素的影响并未减弱, 有时甚至更加强烈, 比如毁林开荒, 开山建路以及淘沙等活动通常在此季节发生, 因此两流域 DSi 含量枯水季节较丰水季节大.

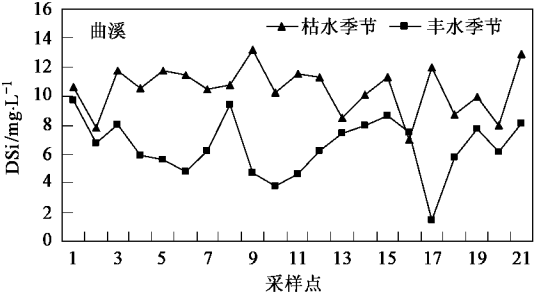


图 2 宝塔河和曲溪流域 DSi 含量季节变化
Fig.2 Season change of DSi in Baotahe and Quxi watersheds

2.2 DIN 的变化特征

宝塔河流域水体中 DIN 平均含量为 $2.61 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其变化范围为 $0.39 \sim 6.85 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. NO_3^- -N 含量的变化范围为 $0.20 \sim 6.80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均为 $2.41 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. NH_4^+ -N 含量的变化范围为 $0.04 \sim 0.19$

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值是 $0.08 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 该流域氮素总体水平不高, 但是个别采样点明显高于其它各点, 如 2、7、13、14 号采样点. 出现该现象的原因可能是这些点上游的土地利用类型主要为农田, 而且农户分布较密集, 从而导致的水体中氮素含量升高. 但总体而

言,宝塔河的农业种植面积只占到流域总面积的45%,氮肥的使用量也比较低,上游大部分区域被林地覆盖.有研究表明,林地和草地中植被对元素的吸收作用能够明显地降低地表水营养物质的含量^[14],该流域植被保护完好,对氮素的流失具有一定的拦截效果.

曲溪水体 DIN 年平均含量为 $6.86\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其变化范围为 $1.34\sim10.67\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,约为宝塔河的 2.5 倍. NO_3^- -N含量的变化范围是 $0.40\sim14.60\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值是 $6.96\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. NH_4^+ -N含量的变化范围是 $0.02\sim0.16\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值是 $0.06\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.曲溪水体 NO_3^- -N含量比同期宝塔河流域高,而 NH_4^+ -N含量

却低于宝塔河流域.曲溪水体 DIN 和 NO_3^- -N含量偏高主要是因为:一方面,曲溪流域是传统的农业区,林地覆盖率较低,农业种植面积占流域总面积的80%以上,氮肥的施用量高;另一方面,该流域土壤为花岗岩发育而成的石英砂土,其渗透性较强,容易导致氮肥的大量流失.水体 NH_4^+ -N含量受人为影响很大, NH_4^+ -N 排放主要来源于生活污水和厩肥^[15],宝塔河流域居民地所占比例大于曲溪流域,居民活动较频繁,这可能是宝塔河水体中 NH_4^+ -N含量高于曲溪的原因.

2 个小流域水体中 DIN 含量的季节变化规律表现为枯水季节大于丰水季节(图3~5),在类似流

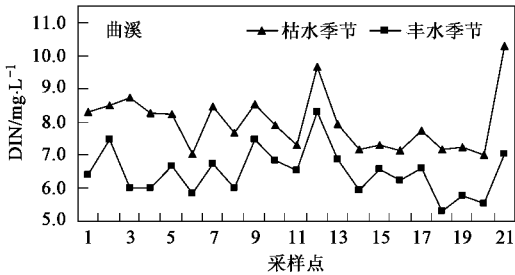
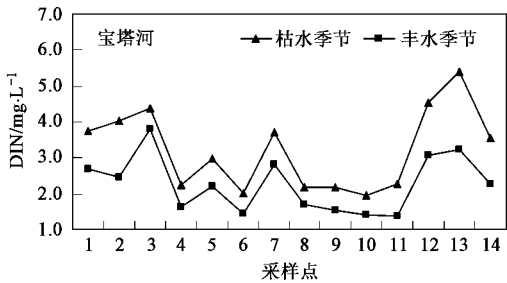


图3 宝塔河和曲溪流域 DIN 含量季节变化

Fig.3 Season change of DIN in Baotahe and Quxi watersheds

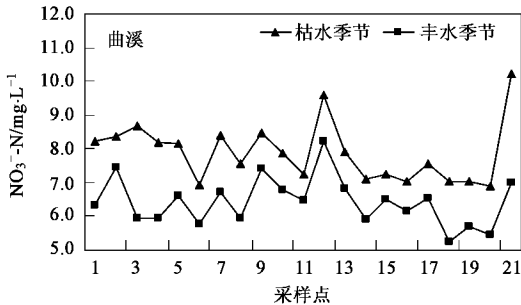
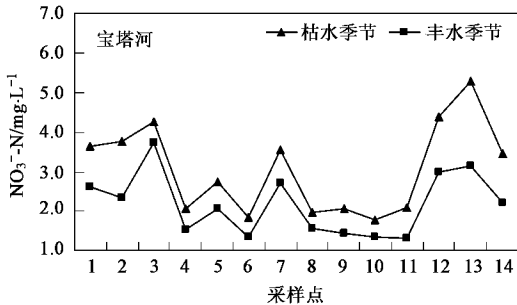


图4 宝塔河和曲溪流域 NO_3^- -N含量季节变化

Fig.4 Season change of NO_3^- -N in Baotahe and Quxi watersheds

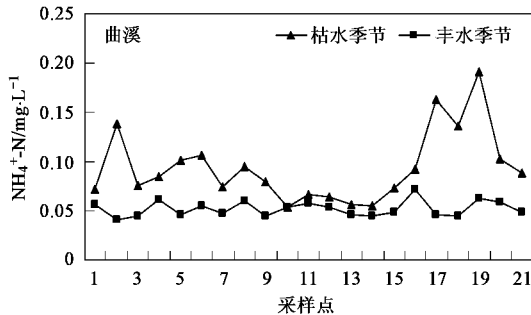
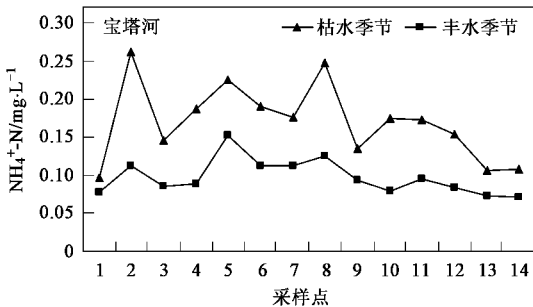


图5 宝塔河和曲溪流域 NH_4^+ -N含量季节变化

Fig.5 Seasonal changes of NH_4^+ -N in Baotahe and Quxi watersheds

域中的营养物质流失研究表明,由于受径流冲刷的影响,夏季是水体 DIN 含量最高的季节^[16,17].本研究结果与相关研究的季节性规律并不一致,这主要是因为本研究区域 2 条河流为无滞留性河,常年流动的河水能够把营养物质迅速带走.此外,两流域农业用地和林地都占到了总面积的 90% 以上,丰水季节是植物生长旺盛时期,对肥料的需求量大,所以即使在丰水季节流域内水体中 DIN 含量在无雨时期也不是很高.相反枯水季节农作物收获,林地对营养物质需求下降,导致营养物质很容易进入水体,从而提高了河流营养物质的含量.

由以上讨论可知,两流域水体中 DIN 的存在形式以 NO_3^- -N为主,而且水体中 NO_3^- -N含量与流域内农业土地的所占比例具有一定的相关性.一些研究

表明,在农业区域,地表水中的氮素主要是通过农田中 NO_3^- -N的淋溶和入渗等途径进入水体的^[3,14],流域内土地利用的特征对流域水体 DIN 含量有很大的影响^[18,19],这说明在小流域中农业活动对水体的 DIN 具有重要的贡献.

2.3 DP 的变化特征

宝塔河和曲溪流域水体 DP 的含量分别在 $0.004 \sim 0.082 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.004 \sim 0.042 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,平均值为 $0.021 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.031 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,变化幅度较大.大部分监测点 DP 含量比张远等^[20]报道的三峡库区各主要支流水体中总磷(TP)含量($0.063 \sim 0.098 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)低.从图 6 可见,2006 年两流域水体中 DP 含量在丰水和枯水季节无明显的差异,且各个采样点之间的含量差异也不大.

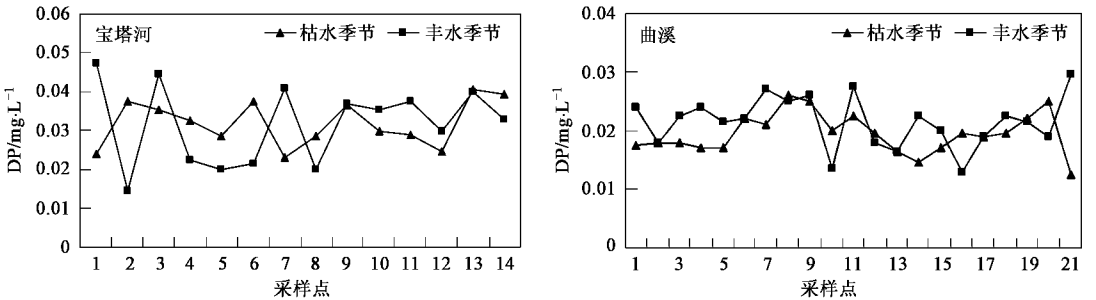


图 6 宝塔河和曲溪流域 DP 含量季节变化

Fig.6 Seasonal changes of DP in Baotahe and Quxi watersheds

一些研究认为磷的流失主要是由降雨决定的^[21,22].本研究区域降雨量年内分布极不均匀,4~9 月份的降雨量占到全年降雨量的 81%,但是两流域水体中 DP 含量在该时期与其它时间并无显著的差异.曲溪和宝塔河的地理位置相近,全年的降雨量及变化规律也相近,尽管土地利用布局、地势地貌和土壤性质具有很大的差别,但两流域 DP 含量却相差不大,这可能暗示水体中 DP 的含量与 DIN、DSi 的主要影响因素不同,具体影响因素还有待探索.

2.4 水体中 Si、N、P 比例及其意义

Si、N、P 等生源要素在河口的时间、空间分布格局和行为是河口地形对生源要素产生影响的直接体现^[23],是河流环境污染状况的直接反映^[24].控制河流硅、氮、磷含量的适当比例,对保护河流环境,控制水体污染以及维持河流正常的生态平衡具有重要的指导意义.

宝塔河流域水体 DSi:DP 为 138:1,而曲溪流域水体 DSi:DP 为 500:1.这一数值比沈志良^[8]报道的

长江中上游一些主要支流中 DSi:DP 要高出很多(表 3).宝塔河和曲溪流域水体 DIN:DP 分别为 81:1 和 350:1,高于长江和汉江水体 DIN:DP,略低于黄浦江水体 DIN:DP.两流域的 DSi:DN 分别为 1.01:1 和 1.12:1,与其它河流相差较大. Justic 等^[28]在总结前人经验的基础上提出了评估水体营养盐的限制标准,即:①若 $\text{DSi:DP} > 22$ 和 $\text{DIN:DP} > 22$,则 DP 为限制因素;②若 $\text{DIN:DP} < 10$ 且 $\text{DSi:DIN} > 1$,则 DIN 为限制因素;③若 $\text{DSi:P} < 10$ 且 $\text{DSi:DIN} < 1$,则 DSi 为限制因素.若按照上述标准,宝塔河和曲溪两流域水体中 DSi:DP 和 DIN:DP 和 DIN:DP 都远大于 22,理论上说明两流域水体富营养化的限制因素均为 DP.目前,国际上一般认为当水体中总磷和总氮的含量分别达到 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,单从营养盐因子考虑,可能会发生藻类疯长的“水华”现象^[29].而两流域 DIN 含量已远远高于 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,DP 含量也大于 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.这说明 2 个流域都有藻类暴发的营养条件,有发生水华的潜在威胁.

表 3 部分河流 DSi、DIN 和 DP 含量比对照表

河流	DSi: DP	DIN: DP	DSi: DN	DSi: DIN: DP	参考文献
宝塔河	138:1	81:1	1.70:1	138:81:1	本研究
曲溪	500:1	350:1	1.43:1	500:350:1	本研究
长江中上游	358:1	80:1	4.5:1	358:80:1	[8, 10]
三峡库区	130:1	75:1	1.80:1	130:75:1	[25]
长江口	10:1	20:1	1:2	10:20:1	[11]
汉江	70:1	15:1	4.17:1	70:15:1	[26]
黄浦江	47:1	94:1	1:2.01	47:94:1	[27]

宝塔河和曲溪流域水体 DSi:DIN 分别为 1.70:1 和 1.43:1.而长江干流水体 2003 和 2004 年份 DSi:DN 值分别为 1.01:1 和 1.12:1^[25,30],由此可见两流域水体 DIN:DSi 比长江干流水体略高.研究表明当水体中 DSi:DN>1:1 时,适合硅藻生长^[28].如果硅藻生长所需的最低限度的 DSi:DIN 值达不到,而 N、P 含量达到一定的程度,则浮游植物群落结构将发生变化,非硅藻成为优势种群是完全有可能的^[4,31].有研究表明,由于人类活动的增强,导致近海口河流水体 DIN、DP 增加和 DSi 的减少,甲藻类浮游植物大量繁殖^[32,33].宝塔河和曲溪的 DSi:DIN 值都大于 1,而且 N、P 的含量也较高,适合硅藻生长,所以,当水体流速和气候条件等因子改变时,局部河段发生水华的可能性很大.

3 结论

(1)在三峡库区宝塔河和曲溪 2 个小流域内的研究表明,由于受到土地利用布局、施肥状况、降雨和水文土壤特征以及地质地貌等因素的影响,该地区水体 Si、N 含量处在一个较高的水平.但该区域为非磷矿区,且农业使用磷肥较少,水体中 P 含量低于长江干流.两流域水体中营养盐的季节变化规律是,DSi 和 DIN 含量枯水季节大于丰水季节,DP 含量无明显季节变化.

(2)宝塔河和曲溪 2 个小流域水体中 Si:P 都远大于 22,DSi:DIN 的比值都大于 1,且 DIN 含量已远远高于 0.2 mg•L⁻¹,DP 含量也大于 0.02 mg•L⁻¹,在水文和气候条件允许的情况下,从营养盐含量角度来看,有发生水华的潜在风险.

参考文献:

[1] 洪一平,叶闽,臧小平.三峡水库水体中氮磷影响研究[J].中国水资源,2004,(20): 23-24.

[2] 刘晓丹.硅在海洋浮游植物群落演替过程中的作用[J].海洋环境科学,1996,15(2): 38-43.

[3] 汪志国,李国刚.水中氮类污染物的联系与区别[J].干旱环

境监测,2003,17(1): 15-18.

[4] Robert R L, John W D, Dubravko J, et al. Changes in stoichiometric Si, N and P ratios of Mississippi River water diverted through coastal wetlands to the Gulf of Mexico [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2004,60(1): 1-10.

[5] Cloern J E. Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem[J]. Marine Ecology Progress Series, 2001,10(1):223-253.

[6] Correll D L, Jordan T E, Weller D E. Beaver pond biogeochemical effects in the Maryland Coastal Plain[J]. Biogeochemistry, 2000,49(3): 217-239.

[7] Humborg C, Conley D J, Rahm L, et al. Silicon retention in river basins: far-reaching effects on biogeochemistry and aquatic food webs in coastal marine environments[J]. American Biology, 2000,29(1): 45-50.

[8] 沈志良.长江磷和硅的输送通量[J].地理学报,2006,61(7): 741-751.

[9] 王孟,邬红娟,马经安.长江流域大型水库富营养化特征及成因分析[J].长江流域资源与环境,2004,13(5):477-481.

[10] 刘瑞秋.三峡大坝截流前后长江中上游江段水化学特性的初步调查[J].水生生物学报,2000,24(5): 446-450.

[11] 赵卫红,李金涛,王江涛.夏季长江口海域浮游植物营养限制的现场研究[J].海洋环境科学,2004,23(4):1-5.

[12] 沈焕庭.长江河口物质通量[M].海洋出版社,2001. 126-127.

[13] 李茂田,程和琴.近 50 年来长江入海溶解硅通量变化及其影响[J].中国环境科学,2001,21(3): 193-197.

[14] 李俊然,陈利顶,郭旭东,等.土地利用结构对非点源污染的影响[J].中国环境科学,2000,20(6): 506-510.

[15] 钱承燊,鲁如坤.农田养分再循环研究:Ⅲ 粪肥的氮挥发[J].土壤,1994,26(4): 169-174.

[16] 况福虹,朱波,徐泰平,等.川中丘陵区小流域非点源氮素迁移的季节特征[J].水土保持研究,2006,15(3):93-95.

[17] 蔡崇法,丁树文,史志华. GIS 支持下三峡库区典型小流域营养流失量预测[J].水土保持学报,2001,15(1):9-12.

[18] Basnyat 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.

[19] 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.
- [20] 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.
- [21] 许其功, 刘鸿亮, 沈珍瑶, 等. 三峡库区典型小流域氮磷流失特征[J]. 环境科学学报, 2007, **27**(2): 326-331.
- [22] 杨钢, 李庆. 三峡库区水体中磷的特征分析[J]. 人民长江, 2007, **38**(2): 14-15.
- [23] 李政, 刘征涛, 王婉华, 等. 长江河口硅和磷生源要素质量浓度的变化特征[J]. 环境科学研究, 2006, **19**(1): 80-83.
- [24] Hydes D J, Gowen R J, Holliday N P, *et al.* External and internal control of winter concentrations of nutrients(N, P and Si) in north-west European shelf seas[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2004, **59**(1): 151-161.
- [25] 余立华, 李道季, 方涛, 等. 三峡水库蓄水前后长江口水域夏季硅酸盐、溶解无机氮分布及硅氮比值的变化[J]. 生态学报, 2006, **26**(9): 2817-2826.
- [26] 徐立, 许顺清, 孙芳, 等. 汉江武汉段浮游藻类动态监测与水质评价[J]. 中国卫生检验杂志, 2005, **15**(11): 1349-1350.
- [27] 胡举波. 黄浦江上游水域水质遥感监测模型的研究[D]. 上海: 同济大学, 2006. 30-33.
- [28] Justic D, Rabalais N N, Turner R E, *et al.* Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: Stoichiometric nutrient balance and its consequences [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1995, **40**(3): 339-356.
- [29] 詹艳慧, 王里奥, 焦艳静. 三峡库区消落带土壤氮素吸附释放规律[J]. 重庆大学学报, 2006, **29**(8): 10-13.
- [30] 柴超, 俞志明, 宋秀贤, 等. 三峡工程蓄水前后长江口水域营养盐结构及限制特征[J]. 环境科学, 2007, **28**(1): 64-69.
- [31] Franz H G, Gonzalez S R, Cadée G C, *et al.* Long-term change of *Temora longicornis* (Copepoda, Calanoida) abundance in a Dutch tidal inlet (Marsdiep) in relation to eutrophication [J]. Netherlands Institute for Sea Research, 1992, **30**(1): 23-32.
- [32] Turner R E, Rabalais N N, Justic D. Predicting summer hypoxia in the northern Gulf of Mexico: Riverine N, P and Si loading[J]. Marine Pollution Bulletin, 2006, **52**(2): 139-148.
- [33] Wang B D. Cultural eutrophication in the Changjiang (Yangtze River) plume: History and perspective [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2006, **69**(3-4): 471-477.

《环境科学》编辑部关于启用编辑信息管理系统公告

《环境科学》编辑部已经开通本刊网站并启用编辑信息管理系统(网站地址: <http://www.hjks.ac.cn>). 该系统能实现在线投稿、在线审稿、期刊浏览检索等功能, 欢迎广大作者、读者和审稿专家使用. 目前我刊所有来稿都通过网站编辑信息管理系统进行. 作者使用编辑信息管理系统投稿时请先进行注册, 注册完毕后以作者身份登录, 按照页面上给出的提示投稿即可. 如果您在使用过程中有问题, 请及时与我刊编辑部联系.

邮政地址: 北京市海淀区双清路 18 号《环境科学》编辑部

邮 编: 100085

电 话: 010-62941102, 010-62849343

传 真: 010-62849343

E-mail: hjks@rcees.ac.cn

网 址: www.hjks.ac.cn